

Sensomotorische Faktoren bei der Entstehung muskulärer Ko-Kontraktionen

*Eine experimentelle Untersuchung behavioraler Parameter bei
erzeugter sensomotorischer Inkongruenz am PC-Arbeitsplatz*



Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung eines Doktorgrades
der Naturwissenschaft des Fachbereichs Humanwissenschaften
im Institut für Psychologie
der Technischen Universität Darmstadt
vorgelegt von

Dipl.-Psych. Oliver Christ, geboren in Bensheim

D 17

Darmstadt, 2009

Tag der Abgabe: 15.12.2008
Tag der Disputation: 29.01.2009

Referent: Prof. Dr. Hardo Sorgatz

Koreferent: Prof. Dr. Sonja Rohrmann

Vorwort

Obwohl diese Arbeit von mir alleine geschrieben und verantwortet ist, so ist das Fertigstellen einer solchen ohne die Hilfe anderer Personen undenkbar. Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Prof. Dr. Hardo Sorgatz, der mir nicht nur diese Arbeit ermöglichte, sondern mich auch bei materiellen, räumlichen und inhaltlichen Hindernissen unterstützte. Ein weiterer Dank geht an Manfred Häfke, Dipl.-Psych. Sarah Diefenbach, Dipl.-Psych. Daniel Ullrich, Tobias Englert und Arne Seehaus, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit ihrem großen Engagement zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Auch wurde diese Arbeit unterstützt vom Institut für Sportwissenschaft (Prof. Dr. Joseph Wiemeyer), deren Leihgabe ihrer EMG-Vorverstärker genauso hilfreich war wie die Leihgabe eines Thermostaten durch das Ernst-Berl-Institut für Technische und Makromolekulare Chemie (Dipl.-Ing. Nadja Keilmann).

Zum Schluss gilt der Dank vor allem meiner Familie, Freunden und wissenschaftlichen Mitarbeitern, die mir in schwierigen Phasen den nötigen Rückhalt geben konnten und somit auf die Fertigstellung dieser Arbeit maßgeblichen Einfluss hatten.

Oliver Christ, Darmstadt im Dezember 2008

Zusammenfassung	1
Teil I Theorie und Modellentwicklung	4
1. Arbeitswissenschaftliche Bedeutung muskuloskeletaler Störungen	4
1.1 Schmerzstörungen und PC-Eingabegeräte	5
1.2 Belastung, Beanspruchung und Adaption	6
2. Bewegungsmuster und –kontrolle	7
2.1 Handlungskontrolle durch Feedback.....	7
2.2 Schreiben an der Tastatur	8
2.3 Arbeit mit Pointing Devices	11
3. Heuristisches Inkongruenzmodell	12
4. Pain Adaption Model (PAM)	16
4.1 Ko-Kontraktionsindizes	18
4.2 Entwicklung eines Ko-Kontraktionsindex nach PAM (KKI_PAM).....	19
5. Entwicklung eines Arbeitsmodells zur Variablenbestimmung	27
Teil II Empirische Prüfung.....	30
6. Studie 1: Visuelle Verzögerung bei der Arbeit mit Pointing Devices	30
6.1 Psychomotorische Anforderung und muskuläre Koordination bei der Bedienung von Pointing Devices	30
6.1.1 Unterschiede von PC- Maus vs. Stift-Tablett.....	31
6.2 Methode Studie 1	35
6.2.1 Training	35
6.2.2 Laboraufbau	38
6.2.3 Laborausstattung und visuelle Verzögerung	40
6.2.4 Elektromyographie	41
6.2.5 Fragebögen	42

6.2.6 Versuchsaufgabe und Zeitmessung	43
6.2.7 Cross-Over-Versuchsplan	44
6.2.8 Versuchsdurchführung	45
6.3 Ergebnisse Studie 1	47
6.3.1 Probanden.....	47
6.3.2 Missempfindung und Beanspruchung.....	48
6.3.2.1 Missempfindungen	48
6.3.2.2 Beanspruchung	50
6.3.3 Leistungswerte	51
6.3.3.1 Reaktionszeiten	51
6.3.3.2 Tastendruckdauer	53
6.3.4 Muskelaktivität.....	53
6.3.4.1 Ruhe- EMG	53
6.3.4.2 Ereigniskorreliertes EMG	57
6.3.5 Ko-Kontraktionen.....	61
6.3.5.1 EMG Ko-Kontraktionen nach Frost et al.	61
6.3.5.2 EMG Ko-Kontraktionen nach KKI_PAM.	63
6.3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse	64
6.4 Diskussion Studie 1	66
6.4.1 Subjektive Parameter.....	66
6.4.2 Reaktionszeiten und Tastendruckdauer.....	67
6.4.4 Ruhe EMG.....	67
6.4.4 Ereigniskorreliertes EMG	68
6.4.4 Visuelle Verzögerung und EMG.....	69

6.4.5 Visuelle Verzögerung und muskuläre Ko-Kontraktionen.....	70
7. Studie 2: Thermische Reizung bei der Tastaturarbeit	73
7.1 Die Bedeutung afferenter Information beim Tastschreiben	73
7.1.1 Thermische Reizung und Muskelaktivität.....	74
7.2 Methode Studie 2	78
7.2.1 Laboraufbau	78
7.2.2.1 Computer.....	79
7.2.2.2 Tastatur.....	80
7.2.2.3 Ereigniskorreliertes EMG	80
7.2.2.4 Schreibeditor	81
7.2.3 Aufgabe	82
7.2.4 Fragebögen.....	84
7.2.5 Stressoren	84
7.2.7 Versuchsplan und Versuchsablauf	85
7.3 Ergebnisse Studie 2	89
7.3.1 Stichprobe.....	89
7.3.2 Kontrollvariablen Befindlichkeit und Temperatur	89
7.3.2.1 Befindlichkeit.....	89
7.3.2.2 Temperaturen	93
7.3.3 Schreibparameter.....	94
7.3.3.1 Anschläge pro Minute (ApM).....	94
7.3.3.2 Tastendruckdauer (TDD)	95
7.3.3.3 Schreibfehler	97
7.3.4 Ereigniskorreliertes EMG	98

7.3.5 Ko-Kontraktionen.....	109
7.3.5.1 Ko- Kontraktionen nach Frost et al.	109
7.3.5.2 Ko-Kontraktionen nach PAM (KKI_PAM).....	113
7.3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse	116
7.4 Diskussion Experiment 2	118
7.4.1 Kontrollvariablen Befindlichkeit und Temperatur	118
7.4.2 Schreibparameter.....	119
7.4.3 Ereigniskorreliertes EMG	120
7.4.4 Ko-Kontraktionen.....	124
8. Diskussion des Arbeitsmodells	127
8.1 Sensorische Inkongruenz durch visuelle Verzögerung	127
8.2 Ko-Kontraktionen und Formel	130
8.3 Fazit und offene Fragen.....	132
9. Literaturverzeichnis.....	134
10. Anhang	150
10.1 Anhang A	150
10.2 Anhang B.....	151
10.3 Anhang C.....	153
10.4 Lebenslauf.....	154
10.5 Erklärung.....	155

Zusammenfassung

In der Dissertation werden Auswirkungen sensomotorischer Inkongruenz beim Tastschreiben und der Bedienung von Pointing Devices (PC- Maus und Stift/Tablett) auf die muskuläre Koordination untersucht. Im Vordergrund steht dabei die nahezu zeitgleiche und damit möglicherweise dysfunktionale Erregung muskulärer Gegenspieler (Ko-Kontraktionen muskulärer Antagonisten). Dieser wird eine Mitwirkung bei der Entstehung chronifizierender muskuloskeletaler Schmerzstörungen im oberen Bewegungsapparat von Bildschirmarbeitskräften zugeschrieben. Die folgenden beiden Fragenstellungen wurden in zwei Experimenten untersucht: 1. Können bei hochgradig überlernten Bewegungen an Pointing Devices (PC-Maus und –Stift) muskuläre Ko-Kontraktionen durch eine Störung der Augen-Hand-Koordination (verzögerte visuelle Rückmeldung) ausgelöst werden und sind diese auch im passiven Organ beobachtbar (bilateraler Transfer)? 2. Ist die Entstehung muskulärer Ko-Kontraktionen bei ballistischen Fingerbewegungen (Tastschreiben) abhängig von thermischen Bedingungen und können letztere sich bei unilateraler Applizierung auch bilateral auf zentral-motorische Parameter wie z. B. die Tastendruckdauer auswirken?

Nach Darstellung der arbeitswissenschaftlichen Bedeutung muskuloskeletaler Schmerzstörungen am PC-Arbeitsplatz werden psychomotorische Parameter der Bedienung von PC-Eingabegeräten beschrieben. Da der Rückmeldung aus peripheren Systemen wie Sehnen, Muskeln und Gelenken eine besondere Rolle beim Auftreten von Bewegungsschmerzen zukommen könnte, wird mittels bestehender Literatur (McCabe et al., 2005; Sorgatz, 2005; Blakemore et al., 2000; Fink et al., 1999; von Holst & Mittelstaedt, 1950) ein heuristisches Modell abgeleitet. Damit wird ein Zusammenhang von Empfindung und ausgeführter Bewegung mittels eines Vergleichsprozesses (Komparator) zwischen hinführender-rückgekoppelter (efferenter) und zurückführender (reafferenter) Information im Organismus postuliert. Treten beim Vergleich zwischen den Informationssträngen akut nicht behebbare Inkongruenzen auf, könnten sie zur Fehlererregung muskulärer Gegenspieler und damit über dysfunktionale Ko-Kontraktionen zum exzentrischen Kontrahieren im schwächeren Muskel führen; ein Prozess, der Faserrisse nach sich ziehen kann. Den daraus folgenden nozizeptiven Erregungen wird nach dem Pain Adaption Model (Lund et al., 1991) durch weitere Ko-Kontraktionen begegnet, die zu einer Hemmung des Bewegungsablaufs führen sollen.

Solche Inkongruenzen zwischen Rückmeldungen über den intendierten und den tatsächlich erfolgenden Bewegungsablauf sollen in dieser Arbeit durch zwei Maßnahmen herbeigeführt werden. Zum einen durch eine Inkongruenz zwischen propriozeptiver Rückmeldung aus dem sich bewegenden Organ und der visuellen Kontrolle dieser Bewegung, zum anderen durch Veränderungen der thermischen Bedingung im Bewegungsorgan.

In der ersten Studie wird die Wirkung visueller Verzögerung (und somit die Inkongruenz von visueller und propriozeptiver Rückmeldung) bei der Arbeit mit Pointing Devices (PC- Maus/ Stift-Tablett), in der zweiten Studie die Wirkung von nicht adäquaten zusätzlichen thermischen Reizen (Inkongruenz durch zusätzliche sensorische Information) bei unterschiedlicher lateraler Belastung während des 10-Finger-Tastschreibens untersucht.

Die Ergebnisse der ersten Studie zeigen unter visueller Verzögerung erhöhte Ko-Kontraktionen, längere Reaktionszeiten sowie erhöhtes Beanspruchungsempfinden bei den Probandinnen. Dabei besteht unter visueller Verzögerung eine Abhängigkeit der muskulären Aktivität des bewegenden (ipsilateralen) sowie nicht bewegenden (kontralateralen) Arms von der Art des Eingabegeräts. Bei der PC-Maus ist die ipsilaterale Erhöhung muskulärer Ko-Kontraktionen auf die erhöhte Aktivität des Agonisten zurückführbar. Beim Stiftklick scheinen andere als die bei der Mausearbeit beteiligten agonistischen Muskeln aktiviert zu werden. Auffällig bei der Stiftarbeit ist eine verringerte ipsilaterale und erhöhte kontralaterale muskuläre Aktivierung unter visueller Verzögerung.

Die Ergebnisse der zweiten Studie zeigen beim Schreiben an der Tastatur unter vorheriger Kältereizung eine erhöhte muskuläre Aktivität, höhere Ko-Kontraktionen und langsames Tippen mit längerer Tastendruckdauer. Dabei ist die Veränderung der muskulären Aktivität aufgrund früherer thermischer Reizung unabhängig von dem sich bewegenden Organ (mit den Fingern der rechten oder linken Hand angeschlagenen Tasten). Wie bei der Arbeit mit der PC-Maus scheinen muskuläre Ko-Kontraktionen den Tastenanschlag erst zu ermöglichen. Die Veränderung der muskulären Aktivität ist je nach Art der Reizung abhängig vom Reizort, jedoch unabhängig von der sich bewegenden Seite.

Beide Studien zeigen, dass Ko-Kontraktionen (im Verlauf der Fingerbewegungen) unter sensomotorischer Inkongruenz durch eine Aktivitätssteigerung des Flexors (Agonist) gekennzeichnet sind. Diese Ko-Kontraktionen unterschieden sich damit von denen, die bei Schmerzen zu beobachten sind (Aktivitätsabnahme des Agonisten bei Aktivitätszunahme des Antagonisten). Daraus resultierende Berechnungsgrundlagen eines Belastungs-Ko-

Kontraktionsindex sowie das Einbeziehen von Schmerzpatienten in weitere Studien werden diskutiert.

Teil I

Theorie und Modellentwicklung

1. Arbeitswissenschaftliche Bedeutung muskuloskeletaler Störungen

Schmerzhafte Störungen des muskuloskeletalen Systems, die einen bewiesenen oder hypothetischen Zusammenhang mit arbeitsbedingten Komponenten aufweisen, verursachen ein Drittel aller Krankheitstage an modernen Arbeitsplätzen (Bureau of Labor Statistics News, 2001). Epidemiologische Daten zu Work Related Upper Extremity Disorders (WRUEDs) zeigen einen Anstieg der krankheitsbedingten Ausfälle von Arbeitnehmern zunehmend auch am Computerarbeitsplatz. Auch wenn die Validität mit der ausgewählten Methode stark schwanken kann (Palmer, Reading, Calnan & Coggon, 2008), bestätigen Daten aus den USA (Barr, Barbe & Clarke, 2004), dass etwa 65% von 333800 neuen Krankheitsfällen ihre Ursache in Erkrankungen des muskuloskeletalen Systems haben. Die Dienstleistungsunternehmen stehen in den Vereinigten Staaten an erster Stelle, wenn es um die Krankheiten durch WRUEDs geht. Sie machen alleine 25.8% aller WRUEDs Fälle aus. Die Produktionsfirmen belegen den zweiten Rang mit 22.9% aller WRUEDs Fälle. Diese kostenträchtigen Leistungseinbußen können durch repetitive Bewegungen (s. u.) verursacht werden und werden dann als Repetitive Strain Injury- Syndrom (RSI) zusammengefasst (Zilske, 2000).

Bei einem typischen Verlauf von RSI-Beschwerden nehmen sogenannte Mikroverletzungen in akuten Belastungssituationen zu. Muskuläre Ko-Kontraktionen (die gleichzeitige Aktivierung von agonistisch und antagonistisch arbeitenden Muskeln) können dabei die Spannung in den Muskelfasern erhöhen und über exzentrische Kontraktionen Gewebsschädigungen und Muskelfaserrisse in den bewegten Organ hervorrufen (LaStayo, Woolf, Lewek, Snyder-Mackler, Reich & Lindstedt, 2003). Dabei wird angenommen, dass nicht repariertes Gewebe kumuliert, da die Arbeitsunterbrechungen nur wenige Stunden anhalten, die Reparaturprozesse aber Tage bis Wochen in Anspruch nehmen. Dies kann zu irreparablen Schäden und neuronalen Umorganisationen (vgl. Byl, Merzenich & Jenkins, 1996) führen, die sich in Schmerzen, sensorischen Störungen und Kraftverlust ausdrücken. Es resultieren motorisch programmierte bzw. konsolidierte (vgl. Eagleman & Churchland, 2006) Schmerzempfindungen (Sorgatz, 2002).

Bei der Hälfte der Fälle, in denen muskuloskeletale Schmerzstörungen auftreten, sind die oberen Extremitäten, vor allem Unterarm, die Hand und die Handgelenke betroffen. Eine hohe Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Hand- und Handgelenkproblemen ist an Arbeitsplätzen möglich, die durch sich wiederholende Tätigkeiten gekennzeichnet sind (Silverstein, Welp, Nelson & Kalat, 1998). Computerarbeitsplätze bergen durch repetitive Bewegung ein hohes Risiko, an muskuloskeletalen Schmerzstörungen oder RSI zu erkranken (Bureau of Labor Statistics, 1997). Aus ergonomischer Sicht wird daher dem Bildschirmarbeitsplatz eine große Aufmerksamkeit gewidmet (Amell & Kumar, 2000). Nach dem Befund einer Arbeitsmittelanalyse des Bundesinstitutes für Berufsbildung (Troll, 2000) verrichten fast zwei Drittel aller Erwerbstätigen in Deutschland (62%) ihre Arbeit mit computergesteuerten Arbeitsmitteln.

1.1 Schmerzstörungen und PC-Eingabegeräte

Symptome wie „Writers- Cramp“ und Muskelschmerz am PC-Arbeitsplatz wurden in den 70er und 80er Jahren mit Haltung, Keyboard-Design und Keyboardhöhe in Verbindung gebracht (Duncan & Ferguson, 1974), obwohl elektromyographische Untersuchungen beim Tastschreiben sowie sich daraus ergebende Ableitungen für die Körperhaltung und Keyboard-Platzierung schon seit den 50er Jahren publiziert worden sind (Lundervold, 1951, 1958). Neuere Studien zur Tastaturarbeit haben u. a. die Platzierung des Keyboards, die Arbeitsplatzgestaltung und die Wirkungsweise unterschiedlicher Keyboardbauweisen auf muskuläre Aktivität und Beanspruchung von Schulter, Nacken und Unterarm untersucht (Rempel, Barr, Brafman & Young, 2007; Van Galen, Liesker & de Haan, 2007; Baker & Cidboy, 2006; Tepper, Vollenbroek-Hutten, Hermens & Baten, 2003; Marklin, Simoneau & Monroe, 1999; Fernström, Ericson & Malker, 1994).

Die Computermaus, die über 20 Jahre lang zur Pointing Device der ersten Wahl gehörte, ist aufgrund von seit den 80er Jahren auftretenden Schmerzsyndromen in den oberen Extremitäten Ziel ergonomischer Studien geworden (Fogleman & Brogmus, 1995). Letztere haben unter anderem die Platzierung der Maus (Cook & Kothiyal, 1998; Delisle, Imbeau, Santos, Plamondon & Monpetit, 2004; Karlqvist, 1998; Karlqvist, Bernmark, Ekenvall, Hagberg, Isaksson & Rostö, 1998) am Arbeitsplatz untersucht. Desweiteren wurden unterschiedliche Kombinationen von Eingabegeräten inklusive unterstützender Peripherie (Fernström & Ericson, 1997; Lintula, Nevala-Puranen & Louhevaara, 2001) und psychische wie physiologische Parameter (Jensen, Borg, Finsen, Hansen, Juul-Kristensen & Christensen,

1998; Jensen, Finsen, Hansen & Christensen, 1999) zum zu untersuchenden Gegenstand gemacht. Keir, Bach und Rempel (1999) zeigten, dass der Carpaltunneldruck während der Benutzung der PC-Maus größer ist als bei bekannten pathologisch veränderten Nervenfunktionen und –strukturen. Im Vergleich mit der neutralen Handgelenkstellung war der Druck während der Bearbeitung der Aufgaben signifikant höher. Andersen, Thomsen, Overgaard, Lassen, Brandt, Vilstrup et al. (2003) berichteten, dass eine wöchentliche Belastung von über 20 Stunden Arbeit mit der PC-Maus mit einem erhöhten Risiko an einer muskuloskeletalen Schmerzstörung in den oberen Extremitäten zu erkranken einhergeht.

1.2 Belastung, Beanspruchung und Adaption

Obwohl die Ätiologie von RSI multifaktoriell ist (Zilske, 2000), beschränkt sich diese Arbeit auf das Konzept von Belastung, Beanspruchung und Adaption (Laube, 2004). Der Begriff Belastung kann hierbei stellvertretend für erhöhten Workload durch thermische Veränderungen (Oksa, Sormunen, Koivukangas, Rissanen & Rintamäki, 2006), Aufgabenveränderung (Szeto, Straker & O'Sullivan, 2005) und Stressinduzierung (Van Galen, Müller, Meulenbroek & Van Gemmert, 2002) stehen. Für die vorliegende Arbeit soll eine bisher noch nicht untersuchte hypothetische Belastungskomponente theoriegeleitet untersucht werden. Letztere wird in dieser Arbeit als sensomotorische Inkongruenz bezeichnet und in zwei Studien durch thermische Reizung und visuelle Verzögerung operationalisiert. Die Beanspruchung ist das biopsychologische Korrelat der sensomotorischen Inkongruenz. Sie steht im Vordergrund dieser Arbeit und resultiert in der am PC-Arbeitsplatz zu bestimmenden abhängigen Variablen. Die Adaption beschreibt das durch Anpassung zeitlich beschränkte Aufrechterhalten der Funktionstüchtigkeit des Organismus. Das Überschreiten der individuellen Belastbarkeit bzw. der Adaptabilität des Organismus kann zur Krankheitsursache werden und Schmerzen hervorrufen (Laube, 2004).

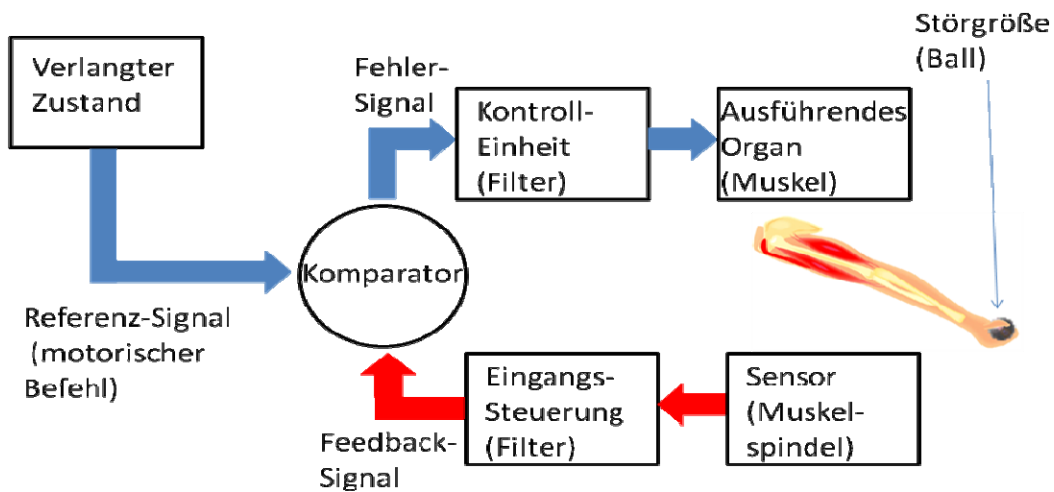
Um sensomotorische Inkongruenzen in ihrer Auswirkung am PC- Arbeitsplatz zu untersuchen, sind im Folgenden Erkenntnisse aus der Psychomotorik und Schmerzforschung zusammengetragen. Dafür ist es notwendig, bestehende Annahmen zu psychomotorischen Grundlagen der PC-Arbeit zu finden. Zum anderen ist es erforderlich nach geeigneten Aussagen oder Modellen zu behavioralen Veränderungen während chronifizierter oder experimentell beobachtbarer muskuloskeletaler Schmerzen zu suchen. Im Anschluss an diese Darstellungen soll ein Arbeitsmodell das Gerüst und die Fragestellung für die im empirischen Teil beschriebenen Studien liefern.

2. Bewegungsmuster und –kontrolle

2.1 Handlungskontrolle durch Feedback

Bewegungen lassen sich u. a. anhand des Ausmaßes verwendeter Rückkopplung (Feedback) beschreiben (Roerding, Peper & Beek, 2005). Sie sind abhängig von sensorischen Informationen, die von peripheren propriozeptiven Organen (z. B. Muskelspindeln, Golgi-Sehnen-Organen) oder dem visuellen System zum Cortex geleitet werden (Schmidt, Lang & Thews, 2004). Das Kontrollprinzip solcher Bewegungen nennt man „closed-loop feedback control“ (Adams, 1971), da die efferenten Anweisungen für die Bewegung wiederholt mit dem afferenten Feedback verglichen werden. Es ergibt sich ein Regelkreis, der die Korrektur der aktuellen Bewegung ermöglicht (s. Kandel, 2000). Aufgrund dieses sich wiederholenden Feedbackabgleichs sind diese Bewegungen langsam und noch nicht überlernt oder automatisiert. Patienten ohne sensible Afferenz (bei bestimmten Rückenmarksverletzungen/schwerer sensibler Neuropathie) zeigen bei Bewegungen mit kurzen Durchführungszeiten oder bei der Initiierung einer komplexen Bewegung, dass diese offenbar ohne Feedback aus der Peripherie durchgeführt werden können (Lashley, 1917; Rothwell et al., 1982; Sanes, Mauritz, Dalakas & Evarts, 1985). Diese „open-loop feedforward control“-Bewegungen laufen auch bei gesunden Menschen schnell ab, ohne dabei Feedback für Korrekturen einzusetzen. Nur gut gelernte, vorprogrammierte Bewegungen erfüllen diese Bedingungen. Die Durchführungszeiten sind dabei so kurz, dass sensorische Einflüsse aufgrund der Nervenleitungszeit nicht korrigiert werden könnten. In Abbildung 1 ist ein Schema beider Bewegungstypen analog zu Ghez und Krakauer (2000) dargestellt. Unter Feedback-Kontrolle (A) wird ein sensorisches Signal (z. B. aktuelle Information über die Lage eines Balles) mit dem Referenzsignal (z. B. beste Haltung) verglichen. Die Differenz wird an eine Kontrolleinheit geschickt, welche eine proportionale Änderung an das ausführende Organ weiterleitet. Feedforward (B) basiert auf Informationen, die zur Verfügung gestellt werden, bevor der Feedback-Sensor aktiviert wird. Diese werden in dem Beispiel vom Auge vermittelt und könnten die Flugroute des Balles enthalten, die beim Zugreifen wichtig ist. Dieser Mechanismus ist bei rapiden Bewegungen essentiell. Neben diesen beiden Bewegungstypen spielen auch Freiheitsgrade eine große Rolle bei der Bewegungsausführung.

a Feedback-Kontrolle: Der Befehl bestimmt den verlangten Zustand



b Feedforward-Kontrolle: Der Befehl spezifiziert die Antwort

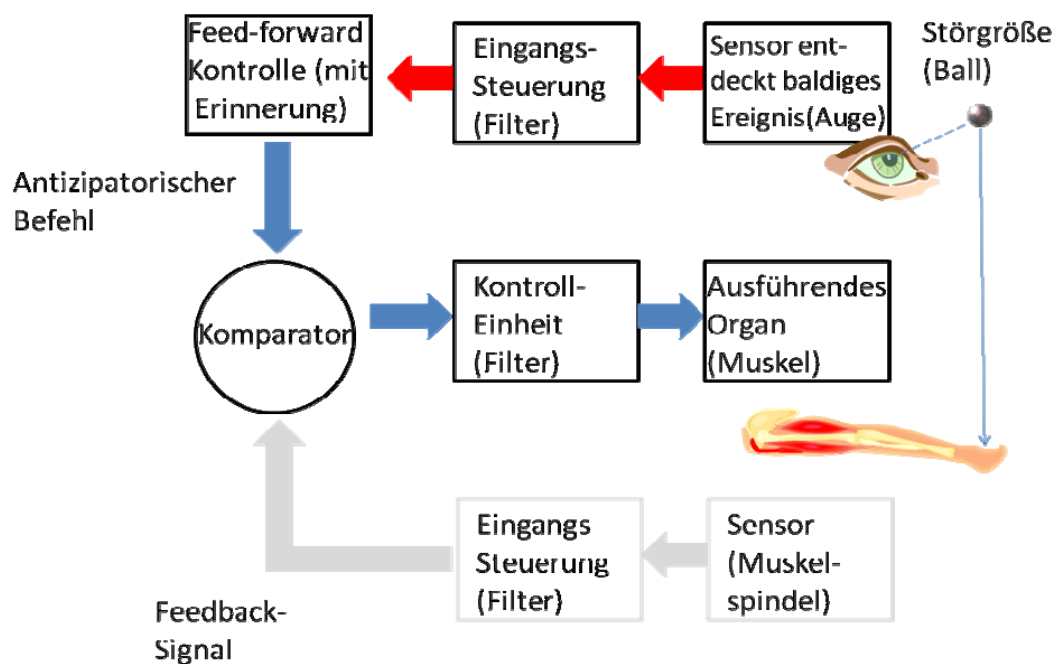


Abbildung 1a, b. Bewegungstypen nach Ghez und Krakauer (2000)

2.2 Schreiben an der Tastatur

Die große Anzahl an Möglichkeiten der Bewegungskontrolle beim Menschen ergibt sich durch räumliche Freiheitsgrade (Bernstein, 1967; Enoka, 1983) der verschiedenen Gelenke, die an einfachen Bewegungen beteiligt sind. Beim Tippen auf einer Tastatur werden für die Hand einschließlich Handgelenk 17 von 22 tatsächlichen Freiheitsgraden genutzt

(Soechting & Flanders, 1997). Das ergibt theoretisch 2^{17} , also über 130.000 mögliche Bewegungskombinationen.

Ein motorisches Programm muss entsprechende Einschränkungen beinhalten, damit nur eine geringe Anzahl von zu kontrollierenden Freiheitsgraden übrig bleibt. Dabei könnte die zeitliche Stabilität der Bewegungseinheiten zueinander ein wichtiges Prinzip bei der Auswahl der Bewegungsvariablen darstellen, da gezeigt wurde, dass bei der Bewegungsplanung die Amplitude einer Bewegung um ein zeitliches Gerüst organisiert wird (Carter & Shapiro, 1984; Robertson & Halverson, 1988). Zusätzlich bestehen motorische Programme aus mehreren Untereinheiten, die auch einzeln in neue Motorprogramme einer neuen Aufgabe transferiert werden können (Kharraz-Tavakol, Eggert, Mai & Straube, 2000). Diese Untereinheiten sind vermutlich in Modulen hierarchisch organisiert und seien exemplarisch in einem Modell zum Schreiben (Teulings, 1994) dargestellt (siehe Abbildung 2).

<p><i>Die zu schreibenden Buchstaben befinden sich im</i> Graphemischen Puffer (enthält den graphemischen Code, d.h. die orthographische Information eines Wortes)</p>
<p><i>Der Inhalt des Pufferspeichers wird geschickt zum</i> Allographischen Speicher (enthält den allographischen Code, d.h. die Buchstabenformen im Silbenkontext)</p>
<p><i>Der abgerufene Code wird abgelegt im</i> Allographischen Pufferspeicher</p>
<p><i>und weitergegeben an den</i> Speicher für das graphische Bewegungsmuster (enthält den Code für das graphische Bewegungsmuster, d.h. die Strichsequenz eines Allographen)</p>
<p><i>Der abgerufene Code wird abgelegt im</i> Pufferspeicher für das graphische Bewegungsmuster</p>
<p><i>Zur Bewegungseinleitung wird der im Puffer abgelegte Code aktualisiert durch den</i> Prozess des Parametersetzens (nichtmuskelspezifische Parameter, wie z. B. Strichlänge, werden festgelegt)</p>
<p><i>und den</i> Prozess der Bewegungseinleitung (muskelspezifische Parameter, z. B. Strichorientierung, Kraft, werden festgelegt)</p>
<p><i>Nervöse Übertragung, Aktivierung von Synapsen und interne Rückmeldungen führen zu</i> Muskelkontraktionen</p>
<p><i>so dass sich die Spitze des Schreibstiftes bewegt, was wiederum analysiert werden kann nach</i> Aufzeichnung und Verarbeitung</p>

Abbildung 2. Übersicht über Module der Handschrift, ihren Inhalt und Operationen, die zwischen ihnen bzw. in ihnen ablaufen.

Das in Abbildung 2 aufgeführte Rahmenmodell zum motorischen Schreibsystem enthält Module, die sich auch auf das Maschineschreiben übertragen lassen, da u. a. der graphemische Puffer für Hand sowie Maschineschreiben genutzt wird (Margolin, 1984).

Analysen von Tippfehlern zeigen, dass Module höherer und niedrigerer Ordnung unterschieden werden können (Rumelhart & Norman, 1982; Grudin, 1983; Kornbrot, 1989; Boyle & Canter, 1987). Beispiele zur Beschreibung von Tippfehlern sowie die zu Grunde liegende Methode sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1

Übersicht der möglichen Fehlerarten beim 10-Finger-Tastschreiben

Autor	Methode	Fehlerart	Beispiel
Rumelhart & Norman (1982)	Simulation & Vergleich mit Daten von Pbn (Gentner, 1981)	Vertauschung von Buchstaben	„special“/ „speical“
		Verdopplung von Buchstaben	„little“/ „liittle“
		Vertauschung von Alternanz	„there“/ „threr“
		Entsprechende Fehler (kontralaterale Seite)	„never“/ „bever“
		Übernahme von ähnlichen Wörtern	„incredibly“/ „incredible“
		Wegfall von Buchstaben	„amount“/ „amont“
		Vertippen (unsystematisch)	„because“/ „bacjse“
Grudin (1983)	Untersuchung mit Videoanalyse	Horizontale Substitution	-
		Vertikale Substitution	-
		Kontralaterale Substitution	-
Boyle & Canter (1987)	Untersuchung einer prof. Schreibkraft nach Schlaganfall	Räumliche Fehler (Umkehrung, Sequenz, Weglassen, Vorwegnahme, Perservieren)	„hear“/ „jear“
		Temporale Fehler	„two cars“/ „two cors“
		Verschiedene Fehler (nicht in räuml. oder zeitl. Fehler passend)	Wortersatz, Buchstabenaddition, Neologismen etc.
		Mehrdeutige Fehler	„top“/ „tpp“
		Unklassifizierbare Fehler (nicht in bisherige Kategorien passend)	„south“/ „scuth“

Die Häufigkeit von Fehlern, bei professionellen Schreibkräften zwischen 1.0 -3.2% (Salthouse, 1986), ist dabei auch abhängig vom verfügbaren Feedback. Dies ist beim Tastschreiben auf kinästhetische/ propriozeptive, visuelle und auditive Rückmeldung begrenzt (Cakir, Hart & Stewart, 1979). Nimmt man geübten Schreibkräften ihr visuelles Feedback durch Abdecken der Tastatur, so machen sie 60 % mehr Fehler (Cakir, 1978). Anästhesiert man ihren Zeigefinger, machen sie ebenfalls mehr Fehler (Gordon & Soechting, 1995). Drastische Interventionen bzw. Einflussnahmen auf das Feedback sind in vielen Studien beschrieben worden. Die Auswirkung von kleinen, teilweise an der Wahrnehmungsschwelle

befindlichen zusätzlichen Reizungen oder konkurrierenden Feedbackinformationen auf resultierende Fehler beim Tastschreiben oder der Mausearbeit wurden bisher nicht untersucht. Die Veränderung des Feedbacks durch einen anderen Tastaturtyp erbrachte keine Veränderung der Fehlermenge (van Galen, Liesker & de Haan, 2007).

2.3 Arbeit mit Pointing Devices

Fehler ohne Veränderung des Feedbacks sind bei der Bewegung mit Pointing Devices abhängig von der Art der Eingabegeräte, den mit ihnen assoziierten Lernerfahrungen und Arbeitsgewohnheiten (Ullrich & Diefenbach, 2006; Zöller & Konheisner, 1999; Lange, 2003; Kotani & Horii, 2003) und der gerätespezifischen Informationsübertragung von Eingabegerät zur Bedienoberfläche (Transformation). Zur Letzteren sind Konzepte aus der Ergonomie und der Psychologie heraus beschrieben worden (Sutter, 2006). Hierbei können isometrische (z. B. Trackpoint) vs. isotonische (z. B. PC-Maus) Eingabegeräte unterschieden werden (Douglas & Mithal, 1997). Erstere übermitteln Signale über die Krafteinwirkung auf das Gerät. Letztere bewirken über durch propriozeptive/ kinästhetische und visuelle Rückmeldung gesteuerte Finger- oder Handbewegung eine Steuerung des Cursors mittels elektronischer, lichtgesteuerter, magnetischer oder akustischer Abtastung des Eingabegerätes.

Heuer (1983) beschreibt in seinem Konzept der Werkzeugtransformation die Relation von Eigenbewegung des Nutzers und der resultierenden Werkzeugbewegung. Dabei besteht diese aus einer Bahntransformation und einer räumlich-zeitlichen Transformation. Die Bahntransformation kennzeichnet räumliche Änderung und Verlagerung der Bewegungsbahn. Dabei könnte im einfachsten Falle die Werkzeugbewegung und die Eigenbewegung gleich (Schraubenzieher), im schwierigeren Falle unterschiedlich (Drehen am Rad eines Feststell-Klemmbocks) verlaufen. Die räumlich-zeitliche Transformation kennzeichnet dagegen die Beziehung von Handposition auf einer Bewegungsbahn und der Werkzeugposition auf der anderen Bewegungsbahn. Letztere beinhaltet eine systembedingte Verzögerung am PC-Arbeitsplatz zwischen Handposition und Werkzeugposition (z. B. Maus auf dem Tisch vs. Cursor auf dem Bildschirm) von ca. 6-61ms durch Mauswahl (Plant, Hammond & Whitehouse, 2003) und 15-72ms durch Wahl des Keyboards (Shimizu, 2002). Nach Sutter (2006) kann die Werkzeugtransformation auch auf die Arbeit mit Pointing Devices übertragen und diese damit klassifiziert werden. Bei dieser Klassifizierung werden propriozeptive/ kinästhetische Eigenheiten oder Eigenschaften, die sich auf das muskuloskeletale System beziehen, nicht berücksichtigt, da sowohl die PC-Maus als auch die Stift-Tablett-Kombination

dieselbe Schwierigkeitsstufe innerhalb der Bahntransformation einnehmen. Diese propriozeptiven/ muskuloskeletalen Eigenschaften haben jedoch durch u. a. Aktivierung älterer motorischer Programme (z. B. Handhabung / Einfluss des Schreibstifts) und vermittels der Auswirkung der stabilen Zuordnung (Positionierung) von Tablett-Punkten zu Monitor-Pixeln Einfluss auf den zu bewältigenden Aufgabentyp wie z. B. Tracking und die Befindlichkeit von Benutzern (Ullrich & Diefenbach, 2006; Lange, 2003; Kotani & Horii, 2003).

Die mit dem Eingabegerät assoziierten propriozeptiven bzw. afferenten (s. u.) Informationen scheinen bei der Entstehung von muskuloskeletalen Erkrankungen eine Rolle zu spielen, da Missempfindungen oder Schmerzen von RSI-Betroffenen selbst nach längerer Pause bzw. Urlaub nach Wiederaufnahme ihrer Tätigkeit und Abruf der motorischen Programme (Schreiben an der Tastatur, Mausbedienung) wieder auftreten (Sorgatz, 2002). Ein erstes Modell ist somit notwendig, das die Entstehung sensorischer Störungen bis hin zu mildem Schmerz sowie die Beeinflussung motorischer Kontrolle durch Veränderung von afferenten Informationen beschreiben kann.

3. Heuristisches Inkongruenzmodell

Von Holst und Mittelstaedt (1950) beschrieben mit ihrem Reafferenzprinzip (v. Camphausen, 1993) einen Vergleichsprozess von Efferenzkopie und Reafferenz. Dabei beginnt eine Bewegung mit der Erzeugung eines efferenten Signalmusters (Efferenz). Dieses Signal beinhaltet die durch neuronale Impulse kodierte Bewegungsausführung (z. B. Auswahl der Muskeln und Stärke der Muskelinnervation) sowie die wieder zurückzuleitende Rezeptorinformation aus den Muskelspindeln und dem Golgi-Sehnen-Organ. Gleichzeitig wird eine Kopie des efferenten Signalmusters (Efferenzkopie) erzeugt. Diese Kopie wird mit der Reafferenz, d.h. der durch die Bewegung erzeugten wiederzugeführten Information der Muskelspindeln, des Golgi-Sehnen-Organ und weiterer Rezeptoren der Peripherie verglichen. Efferenzkopie und Reafferenz werden nun voneinander subtrahiert. Sind beide gleich, dann verschwindet der Bewegungsablauf aus dem Bewusstsein. Es besteht Kongruenz. Ist jedoch eine Diskrepanz zwischen Efferenzkopie und Reafferenz vorhanden, sind Korrekturbewegungen erforderlich. Dieses Prinzip spielt bei der visuomotorischen Koordination eine wichtige Rolle, da vom Gehirn erzeugte Efferenzen zu einer Augenbewegung führen und diese mit den entstehenden Reafferenzen, d.h. dem visuellen Feedback bzw. der Information der Kopf-, Hals- und Augenmuskulatur verrechnet werden

müssen. Bei einer selbsteingeleiteten Bildverschiebung (z. B. Bewegung des Kopfes in die Richtung, aus der man gerufen wurde) sind die beiden Beträge aus Efferenzkopie und Reafferenz genau gleich groß, so dass das Bewegungssignal bei der Differenzenbildung verschwindet. Werden Objekte von einer äußeren Quelle bewegt, so wird der Organismus keine Efferenzkopie erzeugen und die Inkongruenz somit zu einer bewussten Bewegungswahrnehmung führen.

Fink, Marshall, Halligan, Frith, Driver, Frackowiak et al. (1999) untersuchten sensomotorische Inkongruenzen unter Annahme zentralnervöser Vergleichsprozesse. Dabei wurde mit Hilfe einer Positronen-Emissions-Tomografie (PET) die regionale Hirndurchblutung bei kongruenten und inkongruenten Informationen gemessen. In drei experimentellen Designs mussten 23 Probanden Koordinationsaufgaben (Luria's bimanual-coordination task) durchführen. Dabei sollten entweder sogenannte in-phase-Bewegungen (beide Hände führen die gleiche Bewegung aus) oder out-of-phase-Bewegungen ausgeführt werden (beide Hände führen gegenläufige Bewegungen aus). In 50% der Durchgänge wurde ein Spiegel benutzt, so dass die Person nur eine Hand und das entsprechende Spiegelbild sah. Mit Hilfe des Spiegels lassen sich somit auf relativ einfache Weise Inkongruenzen erzeugen, denn bei out-of-phase-Bewegungen werden dann in-phase-Bewegungen wahrgenommen. Bei den PET-Messungen konnten Fink et al. (1999) beobachten, dass innerhalb der Spiegelbedingung und der out-of-phase Bedingung eine erhöhte Aktivität im posterioren parietalen Kortex sowie dorsolateralen präfrontalen Kortex stattfindet. Bei einer evozierten Inkongruenz (out-of-phase in der Spiegelbedingung) konzentriert sich die Aktivität ausschließlich auf den dorsolateralen präfrontalen Kortex. Dieses Gebiet wird der Fehlerverarbeitung zugeschrieben und sorgt durch enge Verschaltung mit anderen Hirnregionen (dem demanterioren cingulären Kortex, dem Thalamus, dem Cerebellum, der Amygdala, dem Hippokampus und den Basalganglien; nach Holroyd und Coles, 2002) für eine ständige Kontrolle der Richtigkeit von Handlungsabläufen (Beschoner, 2006).

Ist die Rückmeldung von Handlungsabläufen zweier Wahrnehmungskanäle inkongruent (z. B. zeitliche Verzögerung der Information), kann dies zur veränderten Wahrnehmung der Rückmeldung führen. Blakemore, Wolpert und Frith (2000) konnten mittels leichter passiver, leichter aktiver, und leichter aktiver, aber verzögerter (100, 200, 300 ms) und richtungsveränderter (30°, 60°, 90°) sensorischer Stimulation der Handoberfläche (Kitzeln) nachweisen, dass mit Zunahme inkongruenter Informationen zwischen visuellem und taktilem Wahrnehmungskanal eine Erhöhung der Einschätzung der Kitzel-Intensität

auftritt. Die Autoren machen dabei den sensomotorischen Konflikt für die Erhöhung der Kitzelempfindung verantwortlich.

McCabe, Haigh, Halligan und Blake (2005) vermuten, dass sensomotorische Konflikte innerhalb des ZNS eine mögliche Ursache für Schmerzstörungen sein könnten. Sie ließen 41 gesunde Probanden u. a. vor einem Spiegel, der sich zwischen beiden Armen befand, eine Reihe von Armbewegungen durchführen. Dabei musste der Spiegel fixiert werden. In der kongruenten Bedingung wurde der nicht sichtbare Arm in vertikaler gleicher Richtung zum sichtbaren Arm bewegt. In der inkongruenten Bedingung wurde der nicht sichtbare Arm in vertikaler Richtung entgegengesetzt zum sichtbaren Arm bewegt. Hierbei wird dem visuellen System eine Bewegung des rechten bzw. linken Arms vorgetäuscht, die nicht mit der tatsächlich ausgeführten Bewegung übereinstimmt, da die Person nur das reflektierte Spiegelbild ihres anderen Arms sieht (siehe Experiment von Fink et al., 1999). 66% der Probanden berichteten während der Versuche mindestens ein ungewöhnliches sensorisches Erlebnis. Am häufigsten traten diese Empfindungen während der inkongruenten Bewegungen auf. Dabei wurden diese als Taubheitsgefühle, Nadelstiche und mäßiger Schmerz beschrieben. Bei einigen Probanden hatte der inkongruente Bewegungsablauf Auswirkung auf Wahrnehmungsprozesse. Einige Versuchspersonen berichteten Temperaturveränderungen, verzerrte Körperwahrnehmung und Orientierungsverlust. Die Autoren vermuten, dass diese Empfindungen auf die verursachten sensomotorischen Konflikte innerhalb der Laborsituation zurückzuführen sind.

Sorgatz (2005) beschreibt in einem schematischen Modell den Zusammenhang zwischen Bewegung, Bewusstsein, Geschwindigkeit der synaptischen Signalübertragung und dem Entstehen von Schmerzempfindungen, denen keine aktuellen Verletzungen zu Grunde liegen. Das MCV-Modell (Motion, Consciousness & Velocity) macht Inkongruenzen zwischen Efferenzkopie und Reafferenz verantwortlich für die Entstehung von Bewegungsschmerzen (Abbildung 3). Ausgehend vom Reafferenzprinzip wird eine neuronale Kontrollkaskade dreier zeitlich aufeinander abgestimmter Neuronenstränge (Reafferenzstrang, Refferenzstrang und Kontrollstrang) angenommen. Dabei erzeugt das motorische Programm mit jeder geplanten Bewegung eine Efferenz, die an die zuständigen Muskelgruppen weitergeleitet wird. Gleichzeitig wird die Efferenzkopie an den Refferenzstrang weitergeleitet. Durch die Bewegung werden die neuronalen Signale der Reafferenz an den Reafferenzstrang gesendet. Die sensorischen Informationen aus Reafferenz- und Refferenzstrang werden im mittleren Kontrollstrang auf Kongruenz geprüft. Treten

Inkongruenzen auf, wird im Kontrollstrang ein sich auf die Bewegung auswirkender Meta-Rhythmus erzeugt. Dieser Metarhythmus (Code of Consciousness oder CoC) modifiziert das motorische Programm und zwingt anderen Neuronenpopulationen seinen Rhythmus auf. Liegt Kongruenz vor, erzeugt der CoC keine bewussten Empfindungen. Durch Inkongruenzen können Schmerzempfindungen entstehen. In diesem Fall wird durch Vergleichsprozesse im Kontrollstrang ein CoC erzeugt, der ins Bewusstsein dringt. Dabei können akute oder frühere Schmerzempfindungen die Efferenzkopie modifizieren. Bei solchen Ereignissen werden vom Organismus Korrekturversuche vorgenommen, indem das Schmerzsignal wieder überschrieben und eine Kongruenz im Kontrollstrang wiederhergestellt wird.

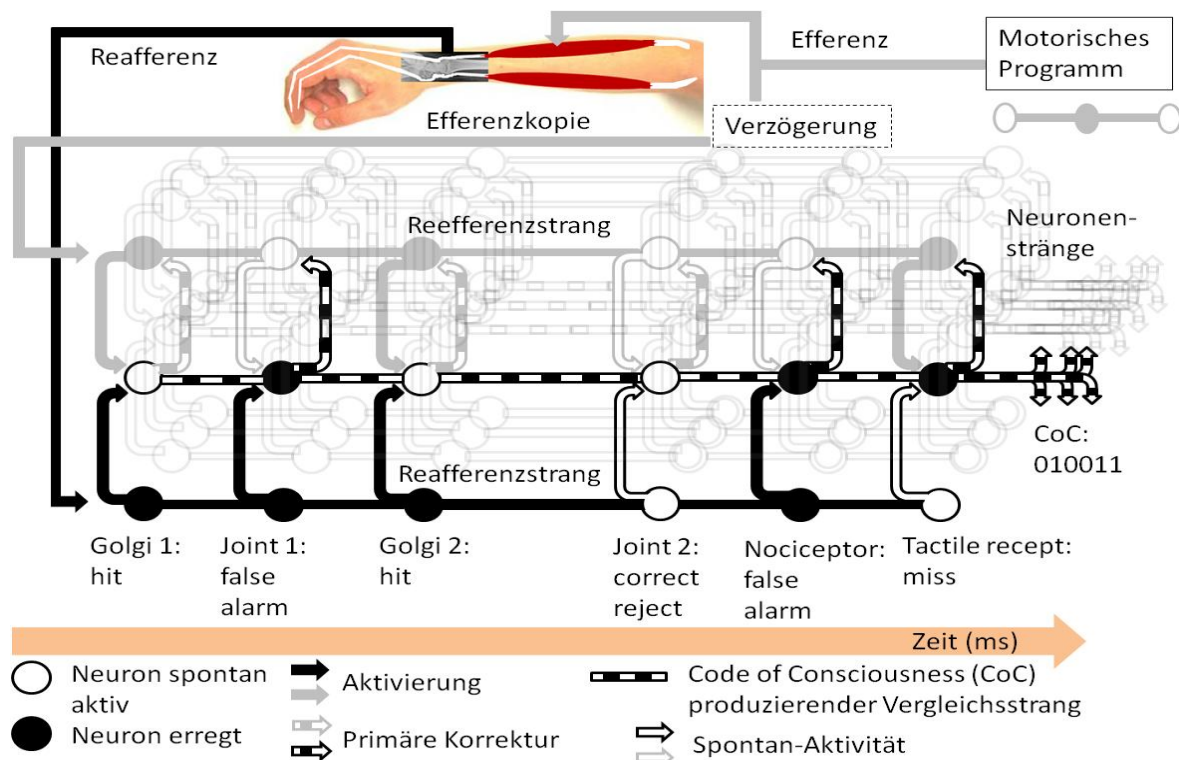


Abbildung 3. MCV-Modell nach Sorgatz (2005)

Alle Studien und theoretischen Überlegungen, die auf Vergleichsprozesse von Efferenzkopie und Reafferenz, somit auf das Prinzip von von Holst und Mittelstaedt (1950), verweisen, beschreiben den Zusammenhang von Bewegung und sensorischer Verarbeitung nach derselben Modellvorstellung. Dieses Modell sei im Folgenden als heuristisches Inkongruenzmodell bezeichnet und in der Abbildung 4 nach Fink et al. (1999), Blakemore et al. (2000), McCabe et al. (2005) und Sorgatz (2005) zusammengefasst.

Sensomotorische Inkongruenzen können im Alltag auch durch Schreckreize erzeugt werden. Diese als Schreckreflex („startle reflex“) bezeichnete Reaktion wird durch schnelle,

intensive und nicht vorhersagbare Ereignisse/Reizungen an Tieren (Blaszczyk, 2003) oder Menschen (Nieuwenhuijzen, Schillings, van Galen & Duysens, 2000) hervorgerufen.

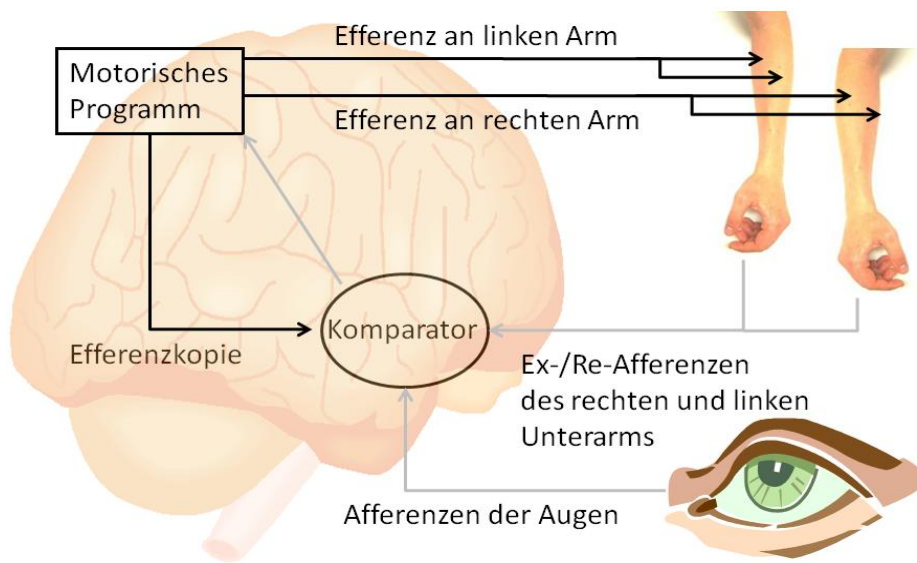


Abbildung 4. Heuristisches Inkongruenzmodell in der Psychomotorik am Beispiel der Afferenzen von Auge und Armmuskulatur. Zusammenfassung nach Fink et al. (1999), Blakemore et al. (2000), McCabe et al. (2005) und Sorgatz (2005).

Der Schreckreflex ist die schnellste generelle motorische Reaktion von Menschen und Tieren (Valls-Sole, Kumru & Kofler, 2008; Blaszczyk, 2003) auf unvorhersehbare Reizungen. „Generell“ bedeutet dabei die gleichzeitige Aktivierung von unter normalen Bedingungen „funktional“ zusammenarbeitenden Muskeln, z. B. beim Gehen, ein alternierendes Muster synergistisch arbeitender Muskelgruppen, die durch einen Schreckreiz dysfunktional gleichzeitig (Ko-Kontraktion) aktiviert werden (Nieuwenhuijzen et al., 2000). Sensomotorische Inkongruenzen können somit dysfunktionale muskuläre Ko-Kontraktionen entstehen lassen, die je nach Bewegungsausführung durch exzentrische Dehnung agonistischer Muskeln Muskelfaserrisse und Schmerzen zur Folge haben können (LaStayo et al., 2003).

4. Pain Adaption Model (PAM)

Neben der Entstehung möglicher dysfunktionaler Ko-Kontraktionen aufgrund sensomotorischer Inkongruenzen sind Ko-Kontraktionen auch bei alltäglichen Bewegungen zu beobachten. Sie haben nachweislich eine Funktion bei der räumlichen Stabilisierung der Position von Gliedmaßen (Suzuki, Shiller, Gribble & Ostry, 2001), Bewegungssteifheit (Gomi & Kawato, 1997), Bewegungsdämpfung (Milner & Cloutier, 1998), bei motorischem

Lernen (Osu, Gomi, Domen, Yoshioka & Kawato, 1999) und der Aufrechterhaltung von Schmerzen. Letzteres wird in einem Modell zur Schmerzadaption zusammengefasst.

Das sog. Pain Adaption Model (Lund, Donga, Widmer & Stohler, 1991; Lund, 1993; Lund & Stohler, 2007; Murray & Peck, 2007; Peck, Murray & Gerzina, 2008) beschreibt bei chronischen und akuten Schmerzen eine über Interneurone verschaltete Inhibition des agonistisch arbeitenden Muskels und Exzitation des antagonistisch arbeitenden Muskels (siehe Abbildung 5). Dieser lokale funktionelle Zusammenhang eines synergistisch arbeitenden Muskelpaares unter Schmerz wird als nützliche Reflexadaption beschrieben, die die Weite und Geschwindigkeit von Bewegung limitiert und somit weiteren Verletzungen und Schmerzen vorbeugt (vgl. Laube, 2004). Werden diese adaptiven Schonhaltungen (Kleinböhl, Baus, Hornberger & Hölzl, 2005) über den regulären Heilungsprozess von bis zu ca. 72 Stunden hinaus beibehalten, können sie weitere Muskelfaserrisse erzeugen und somit die Chronifizierung begünstigen. Das PAM ist an Muskelgruppen wie der Kiefermuskulatur validiert worden (Svensson, Houe & Arendt-Nielsen, 1997; Stohler, Zhang & Lund, 1996). Die Muskelaktivität bei der Mausearbeit konnte während (mittels hypertoner Kochsalzlösung) induziertem Muskelschmerz das Modell teilweise stützen (Birch, Graven-Nielsen, Christensen & Arendt-Nielsen, 2000). Die Autoren fanden eine reduzierte Aktivität des agonistisch arbeitenden Extensor Carpi Ulnaris. Beim Antagonisten war jedoch keine erhöhte Aktivierung sichtbar. Dies könnte u. a. daran gelegen haben, dass die muskuläre Aktivität nicht ereigniskorreliert erhoben wurde.

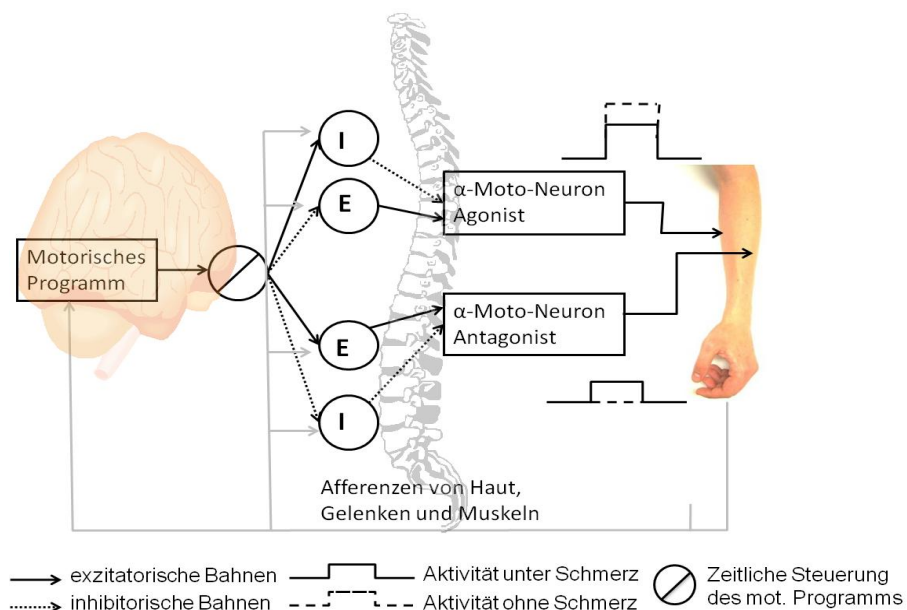


Abbildung 5. Pain Adaption Model nach Lund et al. (1991) am Beispiel der Unterarmmuskulatur.

Obwohl Mense (2004, 2007) zeigen konnte, dass für die Erklärung von Muskelschmerzen sich einfache Modelle vom anatomischen Korrelat teilweise weit entfernen, ist das PAM dennoch von hohem heuristischem Wert für diese Arbeit. Um zu überprüfen, ob unter der Aufrechterhaltung (PAM) dieselben muskulären Ko-Kontraktionen zu beobachten sind wie unter der Entstehung (heuristisches Inkongruenzmodell), soll zunächst die Herleitung eines Ko-Kontraktions-Index (KKI) zur quantitativen Beschreibung von muskulären Ko-Kontraktionen nach dem PAM (KKI_PAM) dargestellt werden. Im Anschluss wird das PAM an die bimanuellen Erfordernisse des PC Arbeitsplatzes angepasst und zur Ableitung untersuchungsrelevanter Variablen mit dem heuristischen Inkongruenzmodell verbunden.

4.1 Ko-Kontraktionsindizes

Indizes zur Berechnung von Ko-Kontraktionen werden aus biomechanischen Modellvorstellungen (Ait-Haddou, Binding & Herzog, 2000; Herzog & Binding, 1993; Hatze, 2001; Olney, 1985; Solomonow, Guzzi, Baratta, Shoji & D'Ambrosia, 1986) hergeleitet. In der Praxis werden sie entweder als prozentuale Verhältnisse von antagonistischer zu agonistischer Aktivität umschrieben (Bobbert, Huijing & van Ingen Schenau, 1987; Bosco & Viitasalo, 1982; Kellis, 1998; Knutson, Soderberg, Ballantyne & Clarke, 1994; Viitasalo, Salo & Lahtinen, 1998; Voigt, Simonsen, Dyhre-Poulsen & Klausen, 1995) oder mittels Integrale MVC (Maximum Voluntary Contraction)-normierter Werte mit unterschiedlichen Formeln berechnet (Kellis, Arabatzi & Papadopoulos, 2003; Falconer & Winter, 1985; Bowsher, Damiano & Vaughan, 1992; Frost, Dowling, Dyson & Bar'Or, 1997; Unnithan, Dowling, Frost, Ayub & Bar-Or, 1996). Bei der Normierung wird jeweils der prozentuale Anteil eines mittleren EMG-Wertes in einer bestimmten Zeiteinheit an der maximalen Kontraktionsfähigkeit des Muskels (MVC) in derselben vorher erhobenen Zeiteinheit bestimmt. Die interindividuelle Variabilität aufgrund unterschiedlicher morphologischer Strukturen im gleichen Muskel unterschiedlicher Probanden wird dabei aufgehoben.

Bei Betrachtung der Formeln erscheint zunächst die formale Beschreibung von Frost et al. (1997) und Unnithan et al. (1996) bei ereigniskorreliertem gleichgerichtetem EMG durch die Berechnung der gemeinsamen Fläche unter der Agonist- und Antagonist-Kurve am geeignetsten für die vorliegende Arbeit. Dabei berücksichtigen die Autoren nicht den Einfluss der Höhe der größeren Muskelaktivität. Bei einer Agonisten-Aktivität von $10\mu\text{V}$ und einer Antagonisten-Aktivität von $9\mu\text{V}$ würde das gleiche Ergebnis herauskommen wie bei einer

Agonisten-Aktivität von $200\mu\text{V}$ und einer Antagonisten-Aktivität von $9\mu\text{V}$. Bei dem ersten Wertepaar würde man von einer deutlichen, beim zweiten Wertepaar von keiner Ko-Kontraktion sprechen. Es entscheidet das Anwachsen der kleineren Fläche (kleinere Muskelaktivität) über die Zunahme der Ko-Kontraktion (siehe Abbildung 7a, b).

Im Folgenden soll daher ausgehend von Frost et al. (1997) eine Formel zur Quantifizierung von Ko-Kontraktionen beschrieben werden, die sich auf das PAM stützt und das mögliche Anwachsen der größeren Muskelaktivität berücksichtigt. Dabei wird eine Simulation in MS Excel zufällige ereigniskorrelierte EMG Agonist- (Strecker-muskulatur des Unterarms) und EMG Antagonist- (Beuger-muskulatur des Unterarms) Werte in angenommenen Mikrovolt (μV) erzeugen. Diese EMG-Datenpaare (EMG-Werte von Agonist und Antagonist) haben sowohl ein unterschiedliches Niveau (z. B. $20\mu\text{V}/20\mu\text{V}$ oder $5\mu\text{V}/5\mu\text{V}$) als auch eine unterschiedliche Ko-Kontraktionsnähe (KKN), d.h. eine unterschiedliche Nähe der Muskelaktivitäten zueinander (z. B. KKN $5\mu\text{V}/5\mu\text{V}$ oder KKN $5\mu\text{V}/6\mu\text{V}$). Im letzten Schritt dienen die EMG-Datenpaare zur Darstellung des nach dem PAM erstellten Ko-Kontraktionsindex (KKI_PAM).

4.2 Entwicklung eines Ko-Kontraktionsindex nach PAM (KKI_PAM)

Zur Veranschaulichung von Ko-Kontraktionen im EMG, die mit einer möglichst gleichzeitigen und gleichstarken Aktivierung von Beuge- und Streckmuskulatur in einem zeitlichen Verlauf erfolgt, wurde eine Formel bzw. Ko-Kontraktionsindex (KKI_PAM) entwickelt und dieser mit Zufallsdaten in einer Simulation geprüft. Hierbei gelten für die Formel folgende Kriterien:

In einem ereignisbezogenen zeitlichen Bereich von 140ms EMG Aktivität

- kann es keine „Null“-Aktivität beider Muskeln geben.
- kann die Fläche unterhalb des Strecker- und Beuger-EMG nicht gleich groß sein.
- ist die muskuläre Belastung durch Ko-Kontraktionen bei erhöhtem Niveau beider Muskeln größer.
- ist „keine“ Ko-Kontraktion durch großen Unterschied der beiden Flächen und somit eine relativ kleine gemeinsame Fläche unterhalb beider Muskeln im EMG gekennzeichnet.

- ist eine große Ko-Kontraktion durch erhöhtes Niveau beider Muskeln und gleichzeitig relativ große gemeinsame Flächen unterhalb der Kurven gekennzeichnet.
- ist eine kleine Ko-Kontraktion durch niedrigeres Niveau beider Muskeln und gleichzeitig relativ kleinere gemeinsame Flächen unterhalb der Kurven gekennzeichnet.

Es wird für die Simulation angenommen, dass in der Praxis das EMG ereigniskorreliert mit 500Hz 140ms (= 70 Werte) lang aufgezeichnet wird und die Werte gleichgerichtet in Mikrovolt vorliegen. Es werden für Strecker und für Beuger des Unterarms zufällige Daten (jeweils 70) erzeugt. Vorgegeben sind mittlere μV -Werte für Beuger und Strecker (5/5 μV ; 10/10 μV ; 15/15 μV ; 20/20 μV ; 5/6 μV ; 5/10 μV ; 16/15 μV). Die Simulation erstellt dann z. B. bei Paar 5/5 μV aus dem Bereich 0-10 μV für beide Muskeln 70 Werte. Da MS Excel die zufällig in einer Reihe erzeugten Werte gleichverteilt, schwankt die Summe der Werte im Beispielpaar 5/5 μV bei beiden Muskeln um 350 (siehe Abbildung 6).

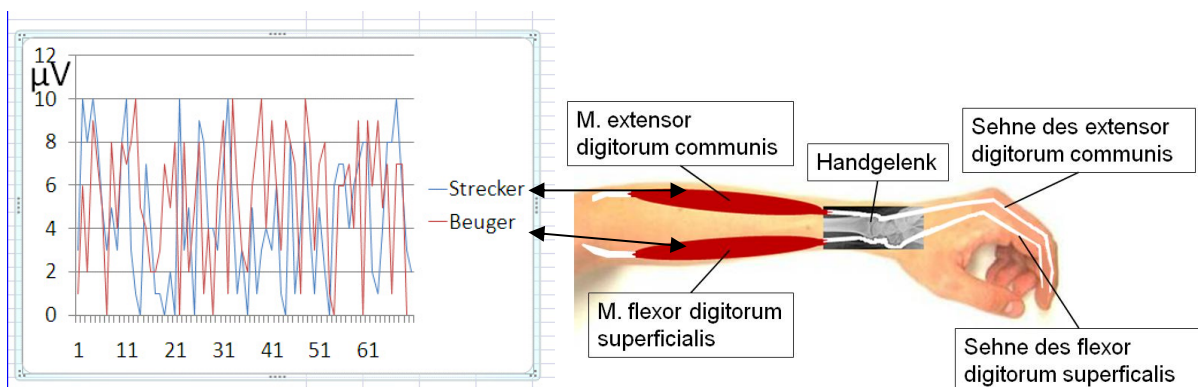


Abbildung 6. 70 zufällig erzeugte EMG-Werte von Beuger (M. flexor digitorum superficialis) und Strecker (M. extensor digitorum communis). Für beide Muskeln werden zufällige EMG-Werte im Bereich 0-10 μV also um 5 μV in MS Excel erzeugt. Die Ko-Kontraktionsnähe (KKN) würde dabei KKN 5,5 lauten.

In einem weiteren Schritt werden die Flächen unterhalb der simulierten 70 Daten pro Muskel errechnet. Dies geschieht mittels Trapezformel nach Biran und Breiner (1999). Die

mittlere Fläche (Dichte) unterhalb zweier Datenpunkte der jeweiligen Beuger- oder Strecker-Kurve lautet dabei:

Formel 1

$$I_{i,j} \approx (x_j - x_i) \frac{f(x_i) + f(x_j)}{2}$$

Anschließend wird die Summe aller Trapeze aller Datenpunktpaare für Beuger und Strecker berechnet und man erhält die Fläche unter Strecker und Beuger mit:

Formel 2

$$F_S = \sum_{i=1}^{69} IS_{i,i+1} \quad (\text{Fläche unter Strecker})$$

und

$$F_B = \sum_{i=1}^{69} IB_{i,i+1} \quad (\text{Fläche unter Beuger})$$

Zur Berechnung der Ko-Kontraktionen wird mit der gemeinsamen Fläche beider Kurven (Strecker & Beuger) begonnen, wie sie Frost et al. (1997) vorschlagen. Um eventuelle negative Zahlen zu vermeiden, wird der Betrag der einzelnen Ausdrücke verwendet. Um die gemeinsame Fläche auch bei unterschiedlicher Alternanz der Kurven zu bestimmen, benötigt man:

Formel 3

$$F_{SB} = \frac{|\sum_{i=1}^{69} IS_{i,i+1} + \sum_{i=1}^{69} IB_{i,i+1}|}{2} - \frac{|\sum_{i=1}^{69} IS_{i,i+1} - \sum_{i=1}^{69} IB_{i,i+1}|}{2}$$

Und mit Flächenabkürzungen vereinfacht:

$$F_{SB} = \frac{|F_S + F_B|}{2} - \frac{|F_S - F_B|}{2}$$

Man erhält die kleinste gemeinsame Aktivität beider Muskeln (kleinere Muskelfläche), wie sie Frost et al. (1997) zur Kennzeichnung muskulärer Ko-Kontraktionen als Index beschreiben. Das Anwachsen der kleineren Fläche ist dabei für die Erhöhung der Ko-Kontraktionen verantwortlich. Zur Verdeutlichung siehe Abbildung 7a, b:

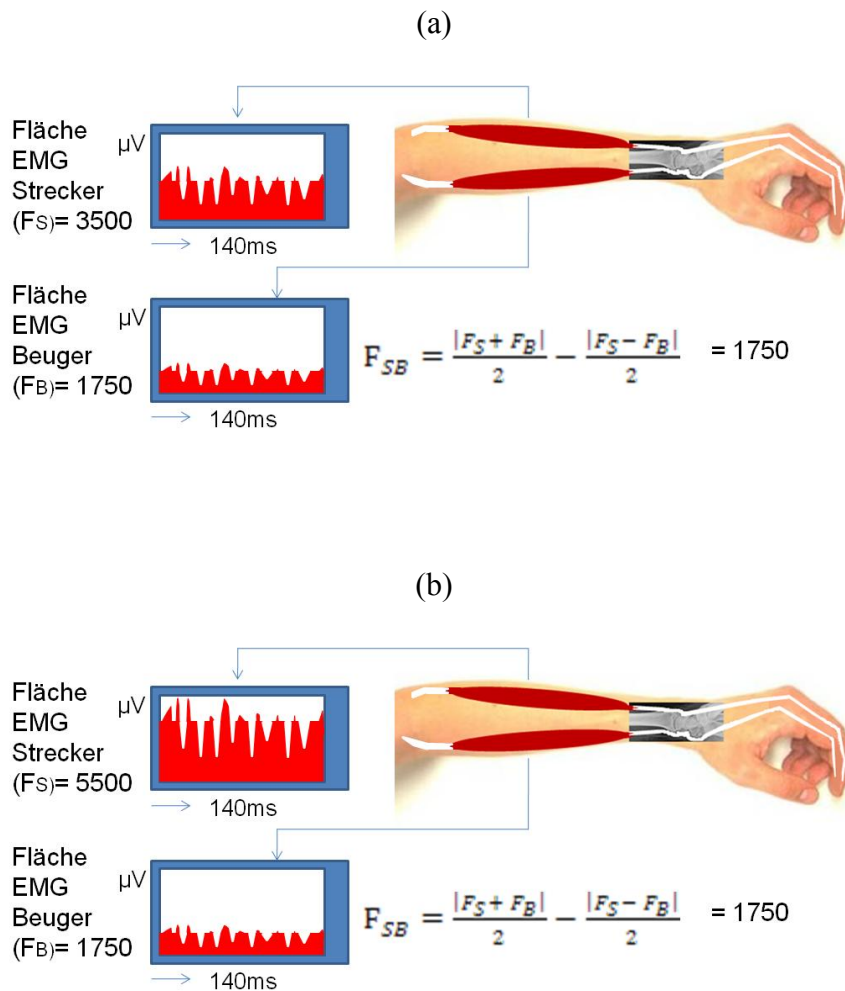


Abbildung 7a, b. Strecker- und Beugermuskulatur des Unterarms. Der Strecker hat unterhalb des EMGs eine fiktive Fläche (rot) von (a) 3500 und (b) 5500 bei gleichbleibendem Beuger (1750) im zeitlichen Verlauf von 140ms. Es ergibt sich die gleiche Ko-Kontraktion (siehe Frost et al., 1997).

Dieser Ausdruck wird nun an der Differenz beider Flächen relativiert. Man erhält ein numerisches Relativ der gemeinsamen Fläche zur Distanz beider Flächen mit:

Formel 4

$$F_{SB} = \frac{|F_S + F_B|}{2} - \frac{|F_S - F_B|}{2}$$

Sind die Aktivitäten der Muskeln stark unterschiedlich, so kann man von einer geringeren Ko-Kontraktion ausgehen. Nicht nur die kleinere Fläche, sondern auch die Höhe der größeren Fläche wirkt nun auf die resultierende Ko-Kontraktion. Abbildung 8 verdeutlicht dies.

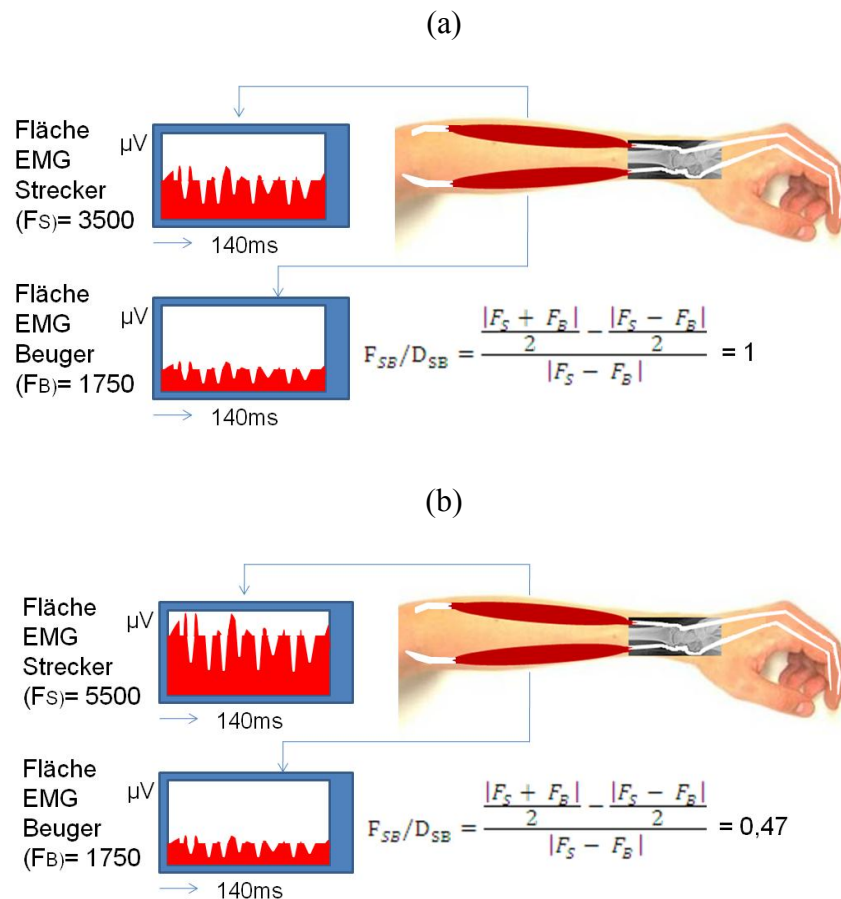


Abbildung 8a, b. Strecker- und Beugermuskulatur des Unterarms. Der Strecker hat unterhalb des EMGs eine Fläche (rot) von (a) 3500 und (b) 5500 bei gleichbleibendem Beuger (1750) im zeitlichen Verlauf von 140 ms. Mit zunehmender Streckeraktivität wird die Ko-Kontraktion kleiner.

Dieser Ausdruck alleine würde beim Wertepaar (Strecker und Beuger) um die $5\mu V$ (KKN 5, 5) den gleichen Ko-Kontraktionsindex ergeben wie bei dem Wertepaar um $20\mu V$. (KKN 20,20) Da jedoch eine erhöhte Chance eines Faserrisses bei erhöhtem Niveau beider Muskeln gegeben ist, muss dieser Ausdruck mit der gemeinsamen Fläche multipliziert werden. Man erhält:

Formel 5

$$F_{SB}^2/D_{SB} = \frac{\frac{|F_S + F_B|}{2} - \frac{|F_S - F_B|}{2}}{|F_S - F_B|} * \left(\frac{|F_S + F_B|}{2} - \frac{|F_S - F_B|}{2} \right)$$

Um die Ergebnisse handhabbarer zu halten, wird dieser Ausdruck noch an der Konstanten 7000 (Datenpunkte) relativiert. Man erhält den Ko-Kontraktions-Index nach PAM (KKI_PAM) von Strecker und Beuger (KKI_PAM_{SB}) mit:

Formel 6

$$KKI_{PAM_{SB}} = \frac{1}{7000} * \frac{\left(\frac{|F_S + F_B|}{2} - \frac{|F_S - F_B|}{2} \right)^2}{|F_S - F_B|}$$

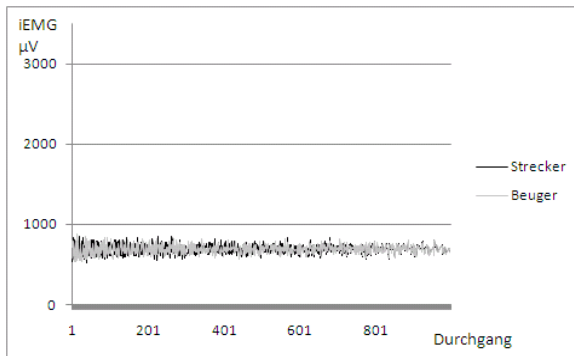
In vereinfachter und umgeformter Schreibweise:

Formel 7

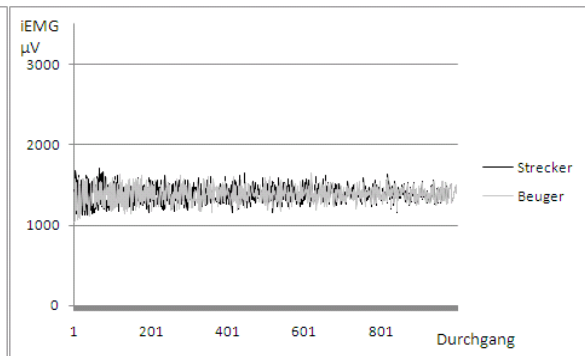
$$KKI_{SB} = \frac{1}{7000} * \frac{\min(F_S, F_B)^2}{\max(F_S, F_B) - \min(F_S, F_B)}$$

Die Simulation erzeugt 1000 zufällige Flächen-EMG-Daten für Strecker und Beuger pro Ko-Kontraktionsnähe (z. B. KKN 5,5). Ordnet man diese absteigend nach relativer Differenz (dabei steht der erste Wert für die maximale relative Differenz von Beuger und Strecker, der letzte Wert für die minimale relative Differenz), erkennt man, wie die Linien sich kontinuierlicher überlappen, bis sie sich beim letzten Durchgang fast vollständig überdecken. Die Ergebnisse sind unter den Bedingungen der oben aufgeführten Wertepaare in Abbildung 9a-g dargestellt.

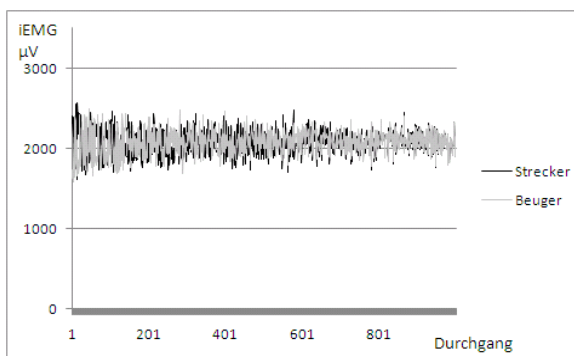
(a) KKN(5,5)



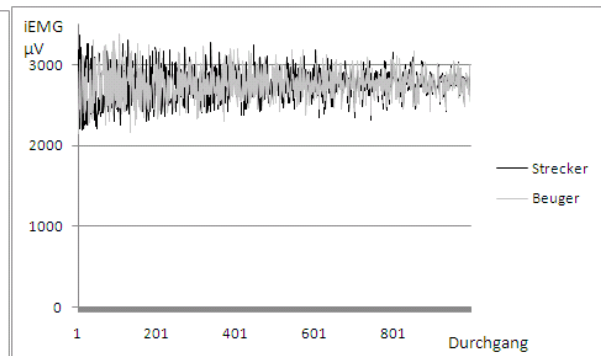
(b) KKN(10,10)



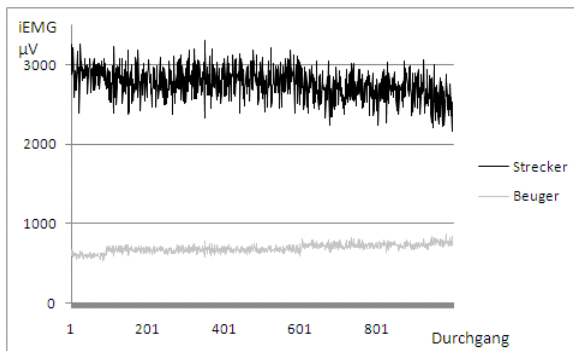
(c) KKN(15,15)



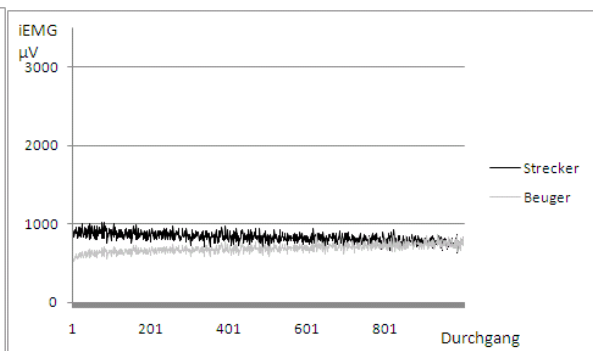
(d) KKN(20,20)



(e) KKN (10,5)



(f) KKN(6,5)



(g) KKI (16,15)

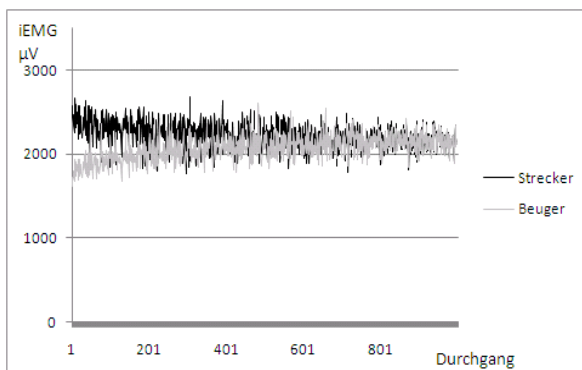


Abbildung 9a-g. 1000 simulierte EMG-Flächenwerte von Strecker- und Beugermuskulatur gebildet aus unterschiedlicher Ko-Kontraktionsnähe (KKN) von Strecker und Beuger in μVolt . Ko-Kontraktionen mit unterschiedlichem Niveau (a-d), keine Ko-Kontraktion (e) und zunehmender Ko-Kontraktionsnähe (f-g).

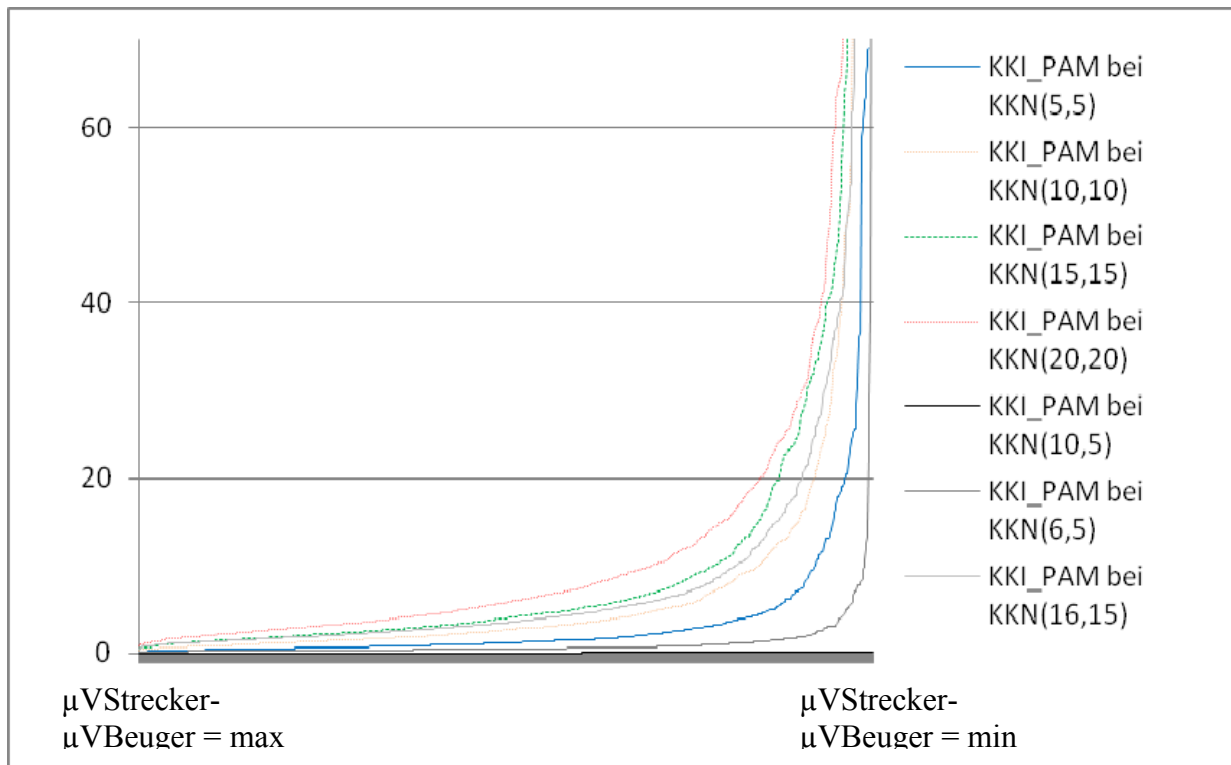


Abbildung 10. Ko-Kontraktionsindex (Formel 7) nach dem Pain Adaption Model (KKI_PAM) in Abhängigkeit angenommener simulierter EMG-Flächen-Wertepaare mit unterschiedlicher Ko-Kontraktionsnähe (KKN).

Um den graphischen Verlauf des KKI_PAM bei unterschiedlichen EMG-Flächen-Wertepaaren zu verdeutlichen, wurden die aus der Abbildung 9a-g zugrundeliegenden Daten in die Formel 7 eingesetzt. Es resultiert pro EMG-Flächen-Wertepaar ein KKI_PAM –Wert, somit bei 1000 EMG-Flächen-Wertepaaren 1000 KKI_PAM –Werte für jeweils eine Ko-Kontraktionsnähe (z. B. KKN 5,5). Die KKI_PAM –Werte sind in Abbildung 10 dargestellt und nach Größe sortiert. Beginnt man bei der „nicht Ko-Kontraktion“ (KKI_PAM bei KKN10,5), erkennt man, dass diese nur als schmaler Streifen nahe der x-Achse erkennbar ist. Anschließend erfolgt die „fast“ Ko-Kontraktion (KKI_PAM bei KKN 6,5). Diese muss kleiner sein als die erste richtige (KKI_PAM bei KKN 5,5). Steigt nun das Niveau beider Muskeln an, verfrüht sich auch das Ansteigen des KKI_PAM und somit die Wahrscheinlichkeit einer höheren Ko-Kontraktion mit Beibehaltung der Relevanz von „fast“ zur „richtigen“ Ko-Kontraktion (vergleiche KKI_PAM 15,15 mit KKI_PAM 16,15).

Es ist ersichtlich, dass der KKI_PAM alleine nur eingeschränkte Aussagekraft besitzt, da ein KKI_PAM von 20 sowohl bei KKN 20,20 als auch, wenn auch weniger wahrscheinlich, bei einer „fast“ Ko-Kontraktion auftreten kann (z. B. KKN 5,6). Letztendlich

ist es entscheidend, welches Niveau zwei Muskeln haben. Erst dann kann man die Bedeutsamkeit für eine mögliche muskuläre Beanspruchung einstufen. Für die im empirischen Teil beschriebenen Studien soll sowohl der KKI_PAM als auch die Beschreibung von Ko-Kontraktionen nach Frost et al. (1997) verwendet werden, da durch sensomotorische Inkongruenz in Form von Schreckreizen ausgelöste dysfunktionale Ko-Kontraktionen zusätzlich zur bereits (aufgrund eines bestehenden motorischen Programms) bestehenden Muskelaktivität Muskeln aktivieren können (Nieuwenhuijzen et al., 2000). Gleichzeitig sollen zur Berechnung die gleichgerichteten Rohdaten verwendet werden, um auch morphologische Unterschiede zu berücksichtigen.

5. Entwicklung eines Arbeitsmodells zur Variablenbestimmung

Um zu überprüfen, ob unter der Schmerzadaption dieselben muskulären Ko-Kontraktionen zu beobachten sind wie unter sensomotorischer Inkongruenz, wird für die im empirischen Teil beschriebenen Studien ein Arbeitsmodell entwickelt. Dabei wird das PAM an die bimanuellen Erfordernisse des PC-Arbeitsplatzes angepasst und zur Ableitung untersuchungsrelevanter Variablen mit dem heuristischen Inkongruenzmodell verbunden (siehe Abbildung 11).

Durch die Verbindung des PAM mit dem heuristischen Inkongruenzmodell lassen sich nun abhängige und unabhängige Variablen identifizieren, um zwei Untersuchungsfragen zu beantworten:

1. Können bei hochgradig überlernten Bewegungen an Pointing Devices (PC-Maus und –Stift) muskuläre Ko-Kontraktionen durch eine Störung der Augen-Hand-Koordination (verzögerte visuelle Rückmeldung) ausgelöst werden und sind diese auch im passiven Organ beobachtbar (bilateraler Transfer)?
2. Ist die Entstehung muskulärer Ko-Kontraktionen bei ballistischen Fingerbewegungen (Tastschreiben) abhängig von thermischen Bedingungen und werden dabei zentral-motorische Parameter wie z. B. die Tastendruckdauer beeinflusst?

Zur Klärung der beiden Fragestellungen sind im Folgenden unabhängige (rote Vierecke) und abhängige (rote Kreise) Variablen im Arbeitsmodell markiert worden (siehe Abbildung 12).

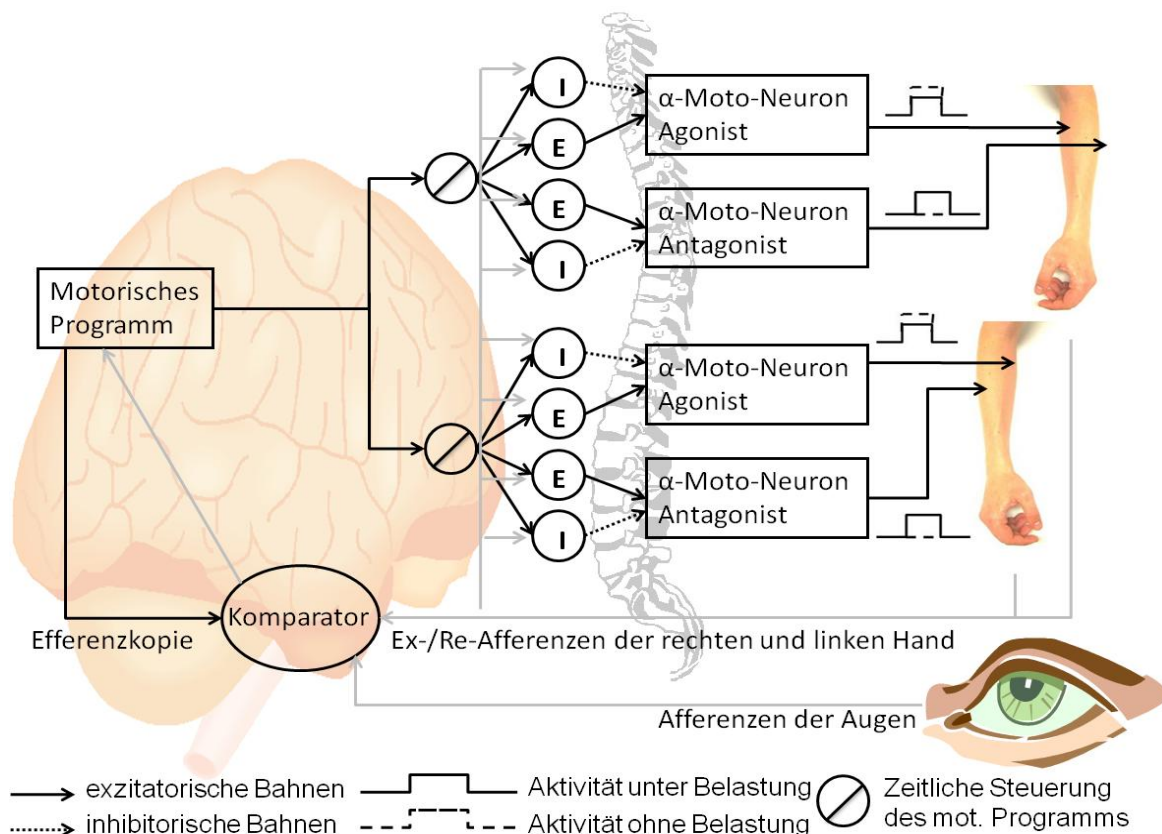


Abbildung 11. Modellverbindung von PAM (Lund et al., 1991) und Inkongruenzmodell nach Fink et al. (1999), Blakemore et al. (2000), McCabe et al. (2005) und Sorgatz (2005). Belastung steht stellvertretend für die Veränderung des afferenten Inputs durch thermische Reizung oder verzögerte visuelle Rückmeldung.

Die unabhängigen Variablen (siehe Abbildung 12, rote Vierecke) stellen dabei das variierte motorische Programm (Efferenz) und die Veränderung des afferenten Inputs durch thermische Reizung oder visuelle Verzögerung dar. Auf die Operationalisierung und Variation dieser Variablen wird in den nachfolgenden Studien detailliert eingegangen. Die abhängigen Variablen (siehe Abbildung 12, rote Kreise) sind die muskulären Muster (der ereignisbezogene, zeitlich stabil zuordnungsbar muskuläre Verlauf eines Muskelpaares), Aktivitäten, Ko-Kontraktionen und die Reaktionszeiten bzw. die Anzahl der erreichten motorischen Antworten innerhalb einer zeitlichen Vorgabe sowie die gemachten Fehler. Als Kontrollvariable wird u. a. die Befindlichkeit der Probanden erhoben.

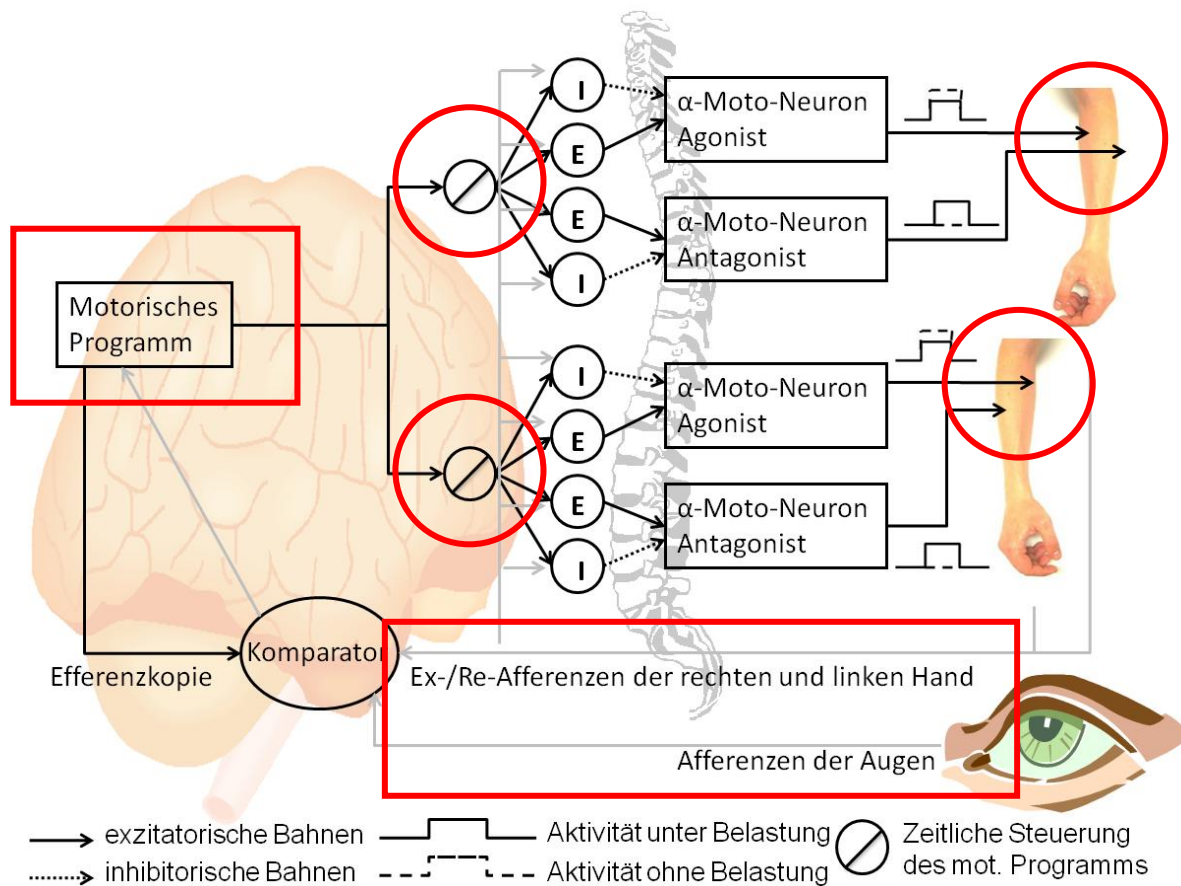


Abbildung 12. Modellintegration von Pain Adaption Model nach Lund et al. (1991) und Inkongruenzmodell nach Fink et al. (1999), Blakemore et al. (2000), McCabe et al. (2005) und Sorgatz (2005). Belastung steht stellvertretend für die Veränderung des afferenten Inputs durch thermische Reizung oder verzögerte visuelle Rückmeldung. Rote Vierecke kennzeichnen die unabhängigen, rote Kreise die abhängigen Variablen.

Teil II Empirische Prüfung

6. Studie 1: Visuelle Verzögerung bei der Arbeit mit Pointing Devices

6.1 Psychomotorische Anforderung und muskuläre Koordination bei der Bedienung von Pointing Devices

Flodgren, Heiden, Lyskov und Crenshaw (2007) haben Handgelenksbewegungen während der Arbeit mit einer PC-Maus aufgezeichnet. Die Effekte der Spannweite der Bewegung, die Grundposition, die Schnelligkeit, die Grundfrequenz in radialer und ulnarer Abweichung, die Beugung und Streckung sowie die Pronation (d. h. nach innen gedrehte Haltung des Unterarms) und Supination (d. h. nach außen gedrehte Haltung des Unterarms) wurden zusammen mit subjektiver Wahrnehmung von Müdigkeit und dem Gefühl für die Handgelenkstellung evaluiert. Die Ergebnisse zeigen starke Müdigkeit in den Muskeln der oberen Extremitäten und eine Reduktion des Gefühls für die Genauigkeit der momentanen Handgelenkstellung gegenüber der neutralen Stellung. Diese Missempfindungen durch Pronation geben erste Hinweise auf haltungsbedingte Beanspruchung. Dabei gilt, dass eine haltungsbedingte reduzierte Muskelspannung nicht immer mit wahrgenommenem erhöhtem Komfort einhergehen muss. Personen können sich unwohler fühlen, wenn Sie in neutraler Stellung mit der Maus arbeiten, obwohl die Unterarmmuskulatur wesentlich entlastet ist (Gustafsson & Hagberg, 2003). Hierbei könnte auch die Abneigung gegenüber neuen technischen Geräten von Bedeutung sein (Mordini, 2007). Die Beurteilung der Anspannung scheint dabei vom Geschlecht, der Art der Aufgabe (z. B. Klicken, Drag & Drop) und der Anforderung an die Genauigkeit (wie zielgenau ist die geforderte Bewegung), die an den Menschen gestellt wird, abzuhängen (Wahlström, Svensson, Hagberg & Johnson, 2000; Visser, De Looze, De Graaff & Van Dieen, 2004).

Zielgerichtete Bewegungen, wie beispielsweise das Wegklicken eines Fensters, unterliegen in der Regel einer propriozeptiven und visuomotorischen Kontrolle. Letztere wird dabei mit einer systembedingten visuellen Verzögerung konfrontiert, die bei Pointing Devices bis zu 61ms (Plant et al., 2003) zwischen Ereignis (z. B. Mausklick) und Reaktion im PC betragen kann. Die Schwelle zum Wahrnehmen solcher visueller Verzögerungen liegt nach Zuberbühler, Krüger und Kündig (2003) innerhalb der Mensch-Computer-Interaktion bei 78 ± 14 ms. Da diese Werte jedoch ohne Angabe zur System-Verzögerung der Messapparatur gemacht wurden, kann man sie nur als Näherungswerte sehen.

Jay und Hubbard (2005) konnten zeigen, dass die Fehlerrate und die Bewegungsausführung linear mit steigender visueller Verzögerung zunehmen. Die Bewegungsausführung wurde ab einer Verzögerung von 94ms (44ms System + 50ms additiv) beeinträchtigt. Das propriozeptive und visuelle Feedback lieferten dabei zueinander inkongruente Informationen (Jay, Glenncross & Hubbard, 2007). Auch bei Trackingaufgaben nehmen die Fehler bei steigenden visuellen Verzögerungsstufen (von 0.2 -1.5 sec) zu, wobei plötzliche Unterbrechungen des visuellen Feedbacks sich weniger auf Fehlerhäufigkeit auswirken als dauerhafte visuelle Verzögerung (Kao, 1977). Auch lassen sich beim Schreiben und Malen mit der Hand eine Zunahme von Fehlern wie „Overshoots“, Verdopplungen und Ersetzen von Buchstaben finden, wenn das visuelle Feedback verzögert ist (Kalmus, Frey & Denes, 1960). Aufgrund fehlender Muskelaktivitätsmessung bei allen diesen Studien ist eine gerichtete Hypothese zur Muskelaktivität unter visueller Verzögerung nicht möglich, da sich der menschliche Organismus ähnlich wie bei Angst (vgl. Furcht: Bradykardie vs. Tachykardie) unterschiedlich verhalten könnte (Karnath & Thier, 2003).

6.1.1 Unterschiede von PC- Maus vs. Stift-Tablett

Bei der PC-Maus steht die optische Rückmeldung vom Monitor im Vordergrund. Diese ist durch Menü-Einstellungen zur Änderung von Cursorgeschwindigkeit und -beschleunigung sowie durch programmbedingte Verzögerungen weitgehend von der propriozeptiven Information abgekoppelt. Der Stift hat dagegen in Verbindung mit einem Tablett eine absolute Positionierung; die Koordinaten der Tablett-Punkte sind denen der Monitor-Pixel stabil zugeordnet. Dies gestattet bei ausreichender Übung, wie beim Tastschreiben, überwiegend propriozeptiv kontrollierte Zielbewegungen. In einer Vorstudie (Lange, 2003) konnte gezeigt werden, dass die Leistung (ms Reaktionszeit) mit dem Stift durch vorheriges Trainieren bei geübten Mausbenutzern an die Performanz der Maus heranreicht (Abbildung 13a, b). Da im Gegensatz zum Tastschreiben die Arbeit mit Pointing Devices nicht auch die Fähigkeit mit dem Stift arbeiten zu können miteinschließt, wurde für diese Studie ebenfalls ein Training konzipiert (s. u.).

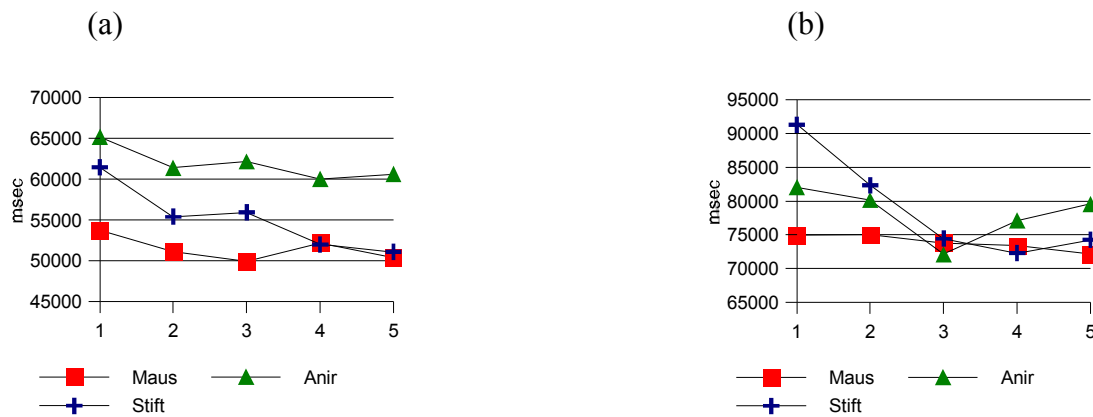


Abbildung 13a,b. Mittelwerte der Leistung mit drei verschiedenen Eingabegeräten in fünf Durchgängen bei einer Drag & Drop (a) und einer Tracking- Aufgabe (b) (N=12) nach Lange (2003).

Dieser „stabilere“ Informationsgewinn durch absolute Positionierung der Bildschirm-Koordinaten auf dem Tablett kann u. a. als eine vereinfachte Bewegungskontrolle durch propriozeptive Signale verstanden werden (Nijhof, 2003). Dabei können diese propriozeptiven Informationen im Vergleich zu den optischen Signalen bei der Mausnutzung weniger durch andere Bildschirmereignisse verfälscht werden und somit dem Gehirn genauere Informationen über die Bewegungsabfolge („Kognitive Karte“) vermitteln (Jueptner & Weiller, 1998).

Kotani & Horii (2003) überprüften neben Leistungswerten (Geschwindigkeit, Genauigkeit) auch die muskuläre Anspannung bei Stiftarbeit und bei Mausearbeit. Zur Prüfung der Bearbeitung unterschiedlicher Aufgabentypen mit Stift und Maus im Vergleich wurden zwei Aufgaben unterschiedlicher Art entwickelt, welche die Versuchspersonen (N=5) an fünf aufeinanderfolgenden Tagen jeweils mit beiden Eingabegeräten zu bearbeiten hatten. Die Aufgabe SL (= straight-line-drawing) erforderte repetitive Tätigkeiten, typische Mausbewegungen wie Klicken und Drag & Drop, die häufiges Strecken und Krümmen des Handgelenks voraussetzten. Die Ergebnisse zeigten reduzierte Muskelaktivität im Unterarm während der Arbeit mit dem Stift. Auch wurde der Stift von Anfang an besser bewertet als die Maus, obwohl die Maus am ersten Tag bessere Performanz ermöglichte. In einer weiteren Studie (Ullman et al., 2003) ergab der Einsatz einer stiftähnlichen Pointing Device eine niedrigere Aktivität der Muskeln (Ruhe-EMG) im Unterarm gegenüber dem Arbeiten mit der Maus. Besonders bei Versuchspersonen, die täglich mit der Maus arbeiteten, zeigte sich eine extreme Reduktion der Muskelspannung durch Verwendung des stiftähnlichen

Eingabegerätes (Abnahme des aktiven Verdrehens des Handgelenks). Anders als in den bisherigen Studien soll in der vorliegenden Untersuchung das EMG neben der Erhebung während Ruhestellung (Ullman et al., 2003) zusätzlich ereigniskorreliert erhoben werden. Das Mausklick-Ereignis scheint dabei aufgrund seiner Kürze am geeignetsten für eine Abnahme ohne motorische Artefakte.

Mausklicks sind ballistische Bewegungen und laufen ähnlich einem Tastendruck beim Maschinenschreiben ab. Ihre Dauer beträgt mit der kognitiven Operation zur Kontrolle der Bewegungsamplitude (70ms), der Initiierung der Bewegung (70ms) und dem Anschlag der Taste (230ms) etwa 370ms (Wandmacher, 1993). Dies sind Näherungswerte, die repräsentativ für einen Mausklick stehen. Beim Tastschreiben an einem Keyboard ist von Überschneidungen der Zeiten (durch unterschiedliche Fingerreihenfolgen) und erweiterten kognitiven Prozessen auszugehen (siehe dazu Gentner, Larochelle & Grudin, 1988). Der EMG-Verlauf (Flexion/Extension) während einer ballistischen Bewegung mit dem Zeigefinger variiert je nach Aufgabentyp, Instruktion, isometrischer oder isotonischer Startbedingung zwischen einem einfachen Burst und drei Bursts (Waters & Strick, 1981; Meinck, Benecke, Meyer, Hönig & Conrad, 1984). Ein Burst stellt dabei eine Bündelung von EMG-Kurven dar. Letztere können sich bei der Kontraktion mehrerer Muskeln während einer ballistischen Bewegung zeitlich überschneiden und somit Ko-Kontraktionen aufzeigen (Castellote, Valls-Solé & Sanegre, 2004). Die oben beschriebenen 370ms stellen für die vorliegende Untersuchung wichtige Eckdaten, sowohl für die zeitlich korrelierte Abnahme von Maus- oder Stiftklicks als auch für die Beschreibung des muskulären Musters dar.

Die Studie hat die Aufgabe zu klären, ob bei hochgradig überlernten Bewegungen an Pointing Devices (PC-Maus und –Stift) muskuläre Ko-Kontraktionen durch eine Störung der Augen-Hand-Koordination (verzögerte visuelle Rückmeldung) ausgelöst werden können und auch im passiven Organ (bilateraler Transfer) beobachtbar sind. Dabei soll der Einfluss von visueller Verzögerung auf die motorische Kontrolle und Leistung bei der Navigation mit dem Stift und der PC-Maus sowie auf muskuläre und subjektive Parameter untersucht werden. Unter Berücksichtigung des im Theorieteil entworfenen Arbeitsmodells werden folgende Hypothesen überprüft:

Hypothese 1

Wenn durch Verzögerung des visuellen Feedbacks bei einer „Point and Click“-Aufgabe der afferente Input des Arms und das visuelle Feedback des Auges dem Organismus inkongruente Informationen bereitstellen, dann

- (a) verändert sich die Höhe der EMG-Aktivität im agonistisch sowie antagonistisch arbeitenden Muskel des ausführenden Organs bei gleichbleibendem Burstverlauf.
- (b) entstehen muskuläre Ko-Kontraktionen.
- (c) steigt die Reaktionszeit.
- (d) wächst die empfundene Beanspruchung.
- (e) nehmen die Missempfindungen zu.

Hypothese 2

Wenn durch Verzögerung des visuellen Feedbacks bei einer „Point and Click“-Aufgabe der afferente Input des Arms und das visuelle Feedback des Auges dem Organismus inkongruente Informationen bereitstellen, dann ist durch die Möglichkeit des Aufbaus einer kognitiven Karte mit Hilfe der 1:1-Zuordnung von Tablett und Bildschirm

- (a) der Unterschied in der ipsilateralen ereigniskorrelierten EMG-Aktivität des Agonisten und Antagonisten während eines Tastenanschlags von unverzögerter zu verzögerter Bedingung bei der Maus größer als beim Stift.
- (b) der Unterschied von muskulären Ko-Kontraktionen während eines Tastenanschlags von unverzögerter zu verzögerter Bedingung bei der Maus größer als beim Stift.
- (c) die Zunahme der Reaktionszeit das nächste Objekt anzuklicken bei gleicher Tastendruckdauer während eines Tastenanschlags von unverzögerter zu verzögerter Bedingung bei der Maus größer als beim Stift.
- (d) die Zunahme der empfundenen Beanspruchung von unverzögerter zu verzögerter Bedingung bei der Maus größer als beim Stift.
- (e) die Zunahme der Missempfindungen von unverzögerter zu verzögerter Bedingung bei der Maus größer als beim Stift.

6.2 Methode Studie 1

Mit Ausnahme der Geräte, für die ein Herstellername angegeben wurde, sind alle in dieser Arbeit verwendeten Apparaturen in der Werkstatt des Psychologischen Instituts der TU-Darmstadt von Herrn Manfred Häfke angefertigt und die für Versuche, Trainings und EMG-Abnahme benötigte Software vom Autor in VB.NET mit Visual Studio 2003 Enterprise Architect als IDE programmiert worden.

6.2.1 Training

Im Rahmen eines drittmittelgeförderten Projektes „RSI-Genese durch Pointing-Devices“ wurden über 100 Studenten der TU-Darmstadt gewonnen, von denen 18 weiblich waren (Sorgatz, Christ, Ullrich & Diefenbach, 2007). Alle Studenten absolvierten ein Training in Gruppen zu sechs Teilnehmern im PC-Pool des Institutes für Psychologie der TU-Darmstadt (siehe Abbildung 14).

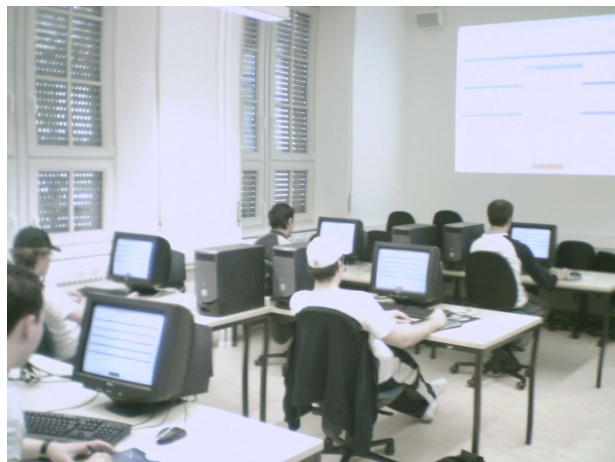


Abbildung 14. Training zur Vorauswahl der Pbn

Das Training beinhaltete das Spielen von u. a. selbst geschriebenen Programmen, in denen die Reaktionszeiten und Fehler-Scores bei Drag and Drop- und bei Point and Click-Aufgaben erfasst wurden. Reaktionszeiten (in Millisekunden/ms) beim Drag and Drop wurden durch das Ziehen von Smileys auf ein Tor erfasst, dabei startete die Stoppuhr bei Erscheinen eines Smileys und stoppte beim Loslassen über dem Tor (siehe Abbildung 15).

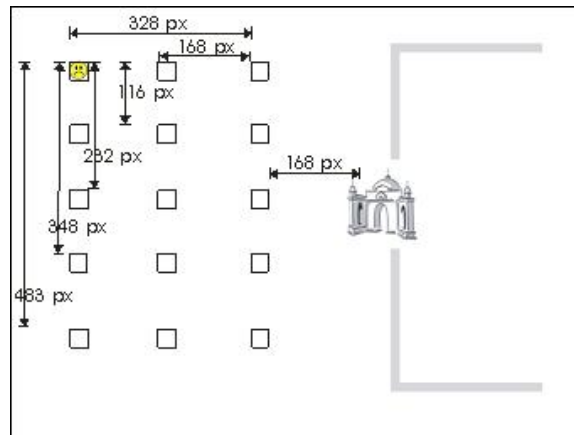


Abbildung 15. Drag and Drop-Trainingsaufgabe

Zur Verbesserung der propriozeptiven Leistung und Entwicklung einer kognitiven Karte wurde ein Point and Click-Spiel entwickelt (siehe Abbildung 16). Hierbei erschienen horizontal von links nach rechts (Aufgabe 1), vertikal von oben nach unten (Aufgabe 2) und aus allen Richtungen in die Mitte gleitende (Aufgabe 3) Hasensymbole. Dabei musste ein blaues Hindernis übersprungen werden. Jede Aufgabe nahm in 5 Stufen (je 45 Sekunden Dauer) an Komplexität (Anzahl der erscheinenden Hasensymbole und Anzahl der zu überspringenden blauen Hindernisse) zu.



Abbildung 16. Screenshot des Spiels zur Verbesserung der propriozeptiven Leistung

Pro weggeklicktem Hasensymbol bekam der Proband 1000 Punkte, pro nicht weggeklicktem Hasensymbol wurden dem Probanden 1000 Punkte abgezogen. Wurde der blaue Balken berührt, veränderte dieser seine Farbe in rot und dem Probanden wurden kontinuierlich 200 Punkte abgezogen, solange sich der Cursor im jetzt roten Feld befand. Die Abfolge des Trainings ist in Tabelle 2 wiedergegeben.

Tabelle 2

Die Abfolge des Trainings

Zeit	Tätigkeit
Ca. 15 Min.	Begrüßung der Pbn, Zuweisung auf Plätze, Vorstellung des Grafiktablets und Stifts
Ca. 5 Min.	Informationen über Ablauf des Trainings
Ca. 5 Min.	Start mit Ausfüllen des Fragebogens (Vorerfahrung)
Ca. 2.5 Min.	Messen der Vorerfahrung (Drag and Drop-Spiel) mit Maus
Ca. 50 Min.	Vorstellen und freies Spielen aller Spiele (Flash/Trainingspiel) und des RSI Quiz
Ca. 45 Min.	Freies Spielen mit Schreibtest
Ca. 15 Min	Trainingsspiel
Ca. 2.5 Min	Drag & Drop-Spiel mit Stift
Ca. 10 Min.	Informationen über weiteres formales Vorgehen und Verabschiedung

Die Leistung nach dem Training (siehe Abbildung 17a-c) betrug ca. 300% der Leistung vor dem Training (gemessen mit dem Trainingsspiel). Nach dem Training betrug der Fehlerwert nur noch 61% des Ausgangswertes vor dem Training (gemessen mit dem Trainingsspiel). Somit machen die Probanden nach dem Training 1/3 weniger Fehler. Die Leistung mit dem Stift nach dem Training betrug ca. 90% der Leistung mit der Maus.

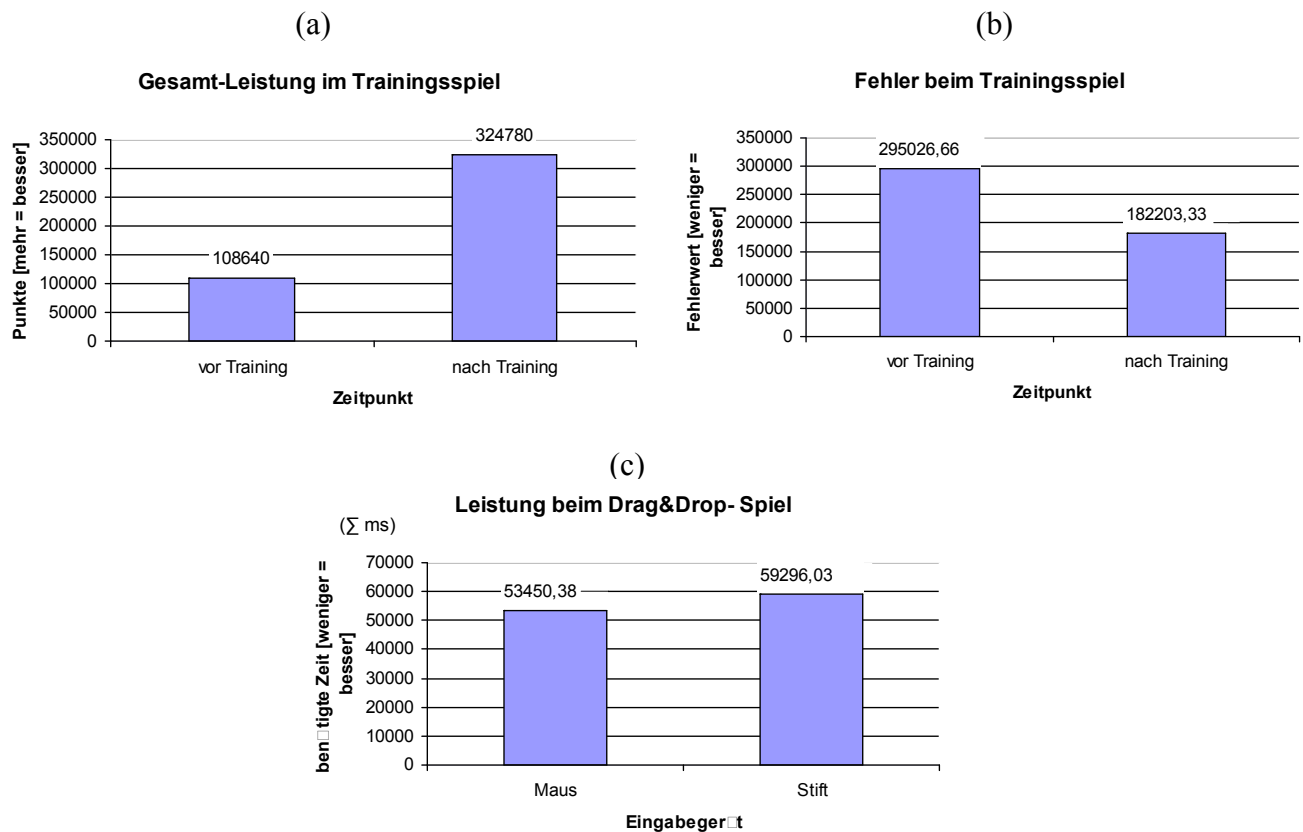


Abbildung 17a-c. Ergebnisse des Trainings. Gesamtleistung (a) und Fehler (b) vor und nach dem Training sowie Leistung von Maus und Stift (c) im Vergleich.

Die im Training erzielten Daten wurden als Zuweisungskriterium zu den Versuchsgruppen verwendet, d. h. aus den Daten der 18 weiblichen Pbn wurde die Rangsumme der Drag and Drop-Aufgabe berechnet. Zur leistungsbezogenen gleichmäßigen Verteilung der Probandinnen wurden diese nach dem even odd-Verfahren einer Maus- und einer Stift-Gruppe und anschließend den jeweiligen Hauptversuchsgruppen (mit Verzögerung/ ohne Verzögerung beginnend) ebenfalls nach even odd zugewiesen (siehe Versuchsplan). 16 Versuchsteilnehmerinnen wurden für diese Studie übernommen.

6.2.2 Laboraufbau

Der Hauptversuch fand in zwei Räumen des arbeitsphysiologischen Labors im Psychologischen Institut der Technischen Universität Darmstadt statt. In Raum Nr. 1 saß der Versuchsleiter (VL) zur Kontrolle der EMG-Parameter während des Versuches (siehe Abbildung 18) und in Raum Nr. 2 die Probandin (Pb). Abbildung 19 zeigt den Arbeitsraum der Pbn, in dem ein Geräuschpegel von ca. 32 dbA und eine durchschnittliche Raumtemperatur von $M=26$, $SD=1.73$ Grad vorherrschten.

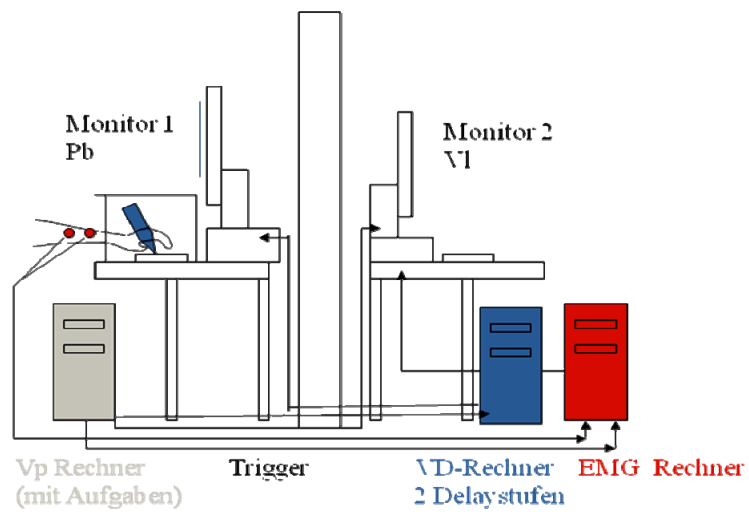


Abbildung 18. Schematischer Aufbau des Versuchslabors



Abbildung 19. Arbeitsplatz der Pbn

6.2.3 Laborausstattung und visuelle Verzögerung

In Tabelle 3 sind die für die Studie verwendeten Rechner wiedergegeben. Um das Eingreifen des Versuchsleiters in den Versuchsablauf zu reduzieren, wurde mit Hilfe des .NET Frameworks (Namespace System.Remoting) eine verteilte Anwendung (Pinnock, Curran & Olsen, 2002), bestehend aus einem Point and Click-Spiel und einer EMG-Applikation entwickelt. Das Point and Click-Spiel automatisierte während der Durchführung die Speicherung des ereigniskorrelierten EMG (s. u.) und die Speicherung der Reaktionszeiten (s. u.).

Zur visuellen Verzögerung wurde das Signal des Probanden-Rechners (Pb-PC) via S-VHS in die Video Capture- Karte des VD-PCs geleitet. Von dort greift das im Fraunhofer Institut Darmstadt von Frank Morbitzer entwickelte Programm „Video Delayer“ auf das Signal zu und stellt dieses in zwei Fenstern dar. Der Desktop des VD-PCs wurde via RGB auf den NFREN-Monitor erweitert und eines der „Video Delayer“- Fenster darin positioniert, so dass die Pbn das Signal des Pb-PCs darin sahen. Dieses Signal konnte nun via „Video Delayer“ im Versuch verzögert werden. Die eingesetzte Verzögerungsstufe von 70 ms wurde in Voruntersuchungen mittels Grenzverfahren als Schwelle zum Bemerken von Verzögerung bestimmt. Sie scheint nach Zuberbühler, Krüger und Kündig (2003) einen validen Wert für eine an der Wahrnehmungsschwelle befindliche Verzögerung innerhalb der Mensch-Computer-Interaktion (Wahrnehmungsschwelle bei 78 ± 14 ms der System-Verzögerung) darzustellen, ist aber nur als Näherungswert zu sehen, da die absolute Verzögerung während Bewegung variiert. Auch die von Jay und Hubbold (2005) errechneten Systemverzögerungswerte können nur Näherungswerte sein. Diese wären auf die vorliegende Versuchsaapparatur übertragen: $16 \text{ ms (60 Hz, Bildwiederholfrequenz)} + 25 \text{ ms (Reaktionszeit)} = 41 \text{ ms Systemverzögerung}$. Ein Versuch mit fotografierten Spiegelbildern von Leuchtdiodenreihen ergab für den vorliegenden Versuchsaufbau einen Systemverzögerungswert von 41ms. Fasst man zusammen, kann man in diesem Versuchsaufbau von einer additiven visuellen Verzögerung von $\text{ca. } 70 + 41 = 111 \text{ ms}$ ausgehen. Für den Ergebnisteil dieser Studie sollen im Folgenden die Abkürzungen ND (Non-Delay) für Systemverzögerung von 41ms und D (Delay) für die visuelle Verzögerung von 111ms stehen.

Tabelle 3

Versuchsrechner

Aufgabe	PC	OS	IDE/Software	CPU	HDD	Speicher	Monitor	son.Hardware
Spielsteuerung	Dell	WinXP	.NET 1.1	P4,	80Gb	512 Mb	Nfren	GeForce
Zeitmessung		SP2	Framework SP1	2.4 ghz			NF-1800	FX5200
(Pb-PC)							MAP	Parallelkarte (Trigger)
EMG	OEM	Win2000	.NET 1.1	P2,	20 Gb	512 Mb	Benq	NI- PCI Karte
(EMG-PC)		SP4	Framework	466			fp71g,	NIDAQ 6025
			SP1	mhz			V7 pd-	
			Measurement Studio, NI				70fa	
Visuelle	Dell	Win2000	Visual Delayer	P4,	40 Gb	512 Mb	Benq	Radeon
Verzögerung-		SP4	Frauenhofer	1.6 ghz			fp71g,	9700AGP
(VD-PC)			Institut				V7 pd-	Video Capture- Card
							70fa	

6.2.4 Elektromyographie

Die Muskelspannung wurde während eines Mausklicks (ereigniskorreliertes EMG) und nach der Aufgabenbearbeitung (Ruhe-EMG) an Beuger- und Streckermuskulatur beider Unterarme in μ Volt erfasst. Die Ableitpunkte des EMG lagen über dem proximalen und distalen Streckermuskel M. extensor digitorum communis sowie über dem proximalen und distalen Beugermuskel M. flexor digitorum superficialis des rechten und linken Unterarms. Abgenommen wurde mit Elektroden des Typs Blue Sensor NS-00-S der Firma Ambu. Die Vorverstärker von Biovision leiteten das Signal über Optokoppler und Trennverstärker mit einem Verstärkungsfaktor von 5000 in die National Instruments NI-DAQ 6025 Karte eines PCs. Dort wurden zwei mit Hilfe der Klassenbibliothek Measurement Studio (NI) entwickelte fernsteuerbare Programme zur EMG-Aufnahme verwendet und das getriggerte Signal bei 500 Hz und 170 Samples pro Kanal in eine Textdatei geschrieben. Die Karte erfasste die Daten nach FIFO (First in First out) Speichermodell kontinuierlich. Dies ermöglichte die ereigniskorrelierte Erfassung des EMG via Trigger 140ms (70 Samples) vor dem Tasten-Onset (Pretrigger/PT) sowie 200ms (100 Samples) nach dem Tasten-Onset. Es resultiert pro Tastendruck ein EMG- Tastendruckzeitfenster von insgesamt 340ms (170 Samples). Das

integrierte EMG zur Ruhemessung wurde mit gleicher Hardware in einem zweiten Programm aufgezeichnet. Die Erfassung dauerte 10 Sekunden bei gleicher Aufzeichnungsfrequenz.

6.2.5 Fragebögen

Das subjektive Beanspruchungserleben und die körperliche Missempfindung wurden mit NASA TLX (Task Load Index, Hart & Staveland, 1988) und visuellen Analogskalen zur Missempfindungsabfrage (siehe Anhang A) gemessen. Der NASA TLX ist ein multidimensionales Bewertungsinstrument, die Arbeitsbeanspruchung setzt sich hier aus sechs Subskalen zusammen. Die sechs TLX-Dimensionen sind geistige Anforderungen, körperliche Anforderungen, zeitliche Anforderungen, Ausführung der Aufgaben, Anstrengung und Frustration. Einige Dimensionen beziehen sich somit auf direkte, sich durch die Aufgabe ergebende Anforderungen, andere ergeben sich durch Interaktion von Aufgabe und die an das Subjekt gestellten Anforderungen. Mit den visuellen Analogskalen sollte das Ausmaß des Zutreffens (durch ein Kreuz auf einer 10cm langen Linie) von Aussagen über eigene Missempfindung (Spüren von Anspannung, Schmerzen, Kribbeln oder Taubheit, jeweils im Unterarm- und Nacken/Schulterbereich) eingestuft werden. Die Pole waren mit „nicht wahrnehmbar“ und „deutlich wahrnehmbar“ bezeichnet. Zudem bearbeiteten die Probanden zu Beginn des Versuchs den Arbeits-Profil-Survey (APS), mit dem individuelle Arbeitsgewohnheiten und etwaige Beschwerden im Zusammenhang mit PC-Arbeit erfragt werden. Das individuelle psychomotorische Tempo wurde durch einen Tappingtest (siehe Ullrich & Diefenbach, 2006) erfasst. Hierbei sollte ein Taster innerhalb von 15 Sekunden so oft wie möglich gedrückt werden (siehe Abbildung 20). Die Anzahl der Anschläge wurde dabei elektronisch erfasst.



Abbildung 20: Tappingtest zur Messung des individuellen Tempos

6.2.6 Versuchsaufgabe und Zeitmessung

Die Probanden sollten mit unterschiedlichen Eingabegeräten zufällig am Bildschirm erscheinende Smileys wegeklicken. Die Eingabegeräte waren eine Logitech-Optical-USB-Maus (Modellnr. M-BD58, siehe Abbildung 21a), es wurden alle Default- Einstellungen verwendet (mittlere Zeigergeschwindigkeit), und ein Wacom-Grafik-Tablett (Graphire 3 Graphics Tablet Modell XD-0405-U, siehe Abbildung 20b) mit Stift (ebenfalls USB). Die seitliche untere Taste des Stifts entsprach der linken Maustaste, die Funktion des Aufdrückens der Stiftspitze als Mausklick wurde deaktiviert.

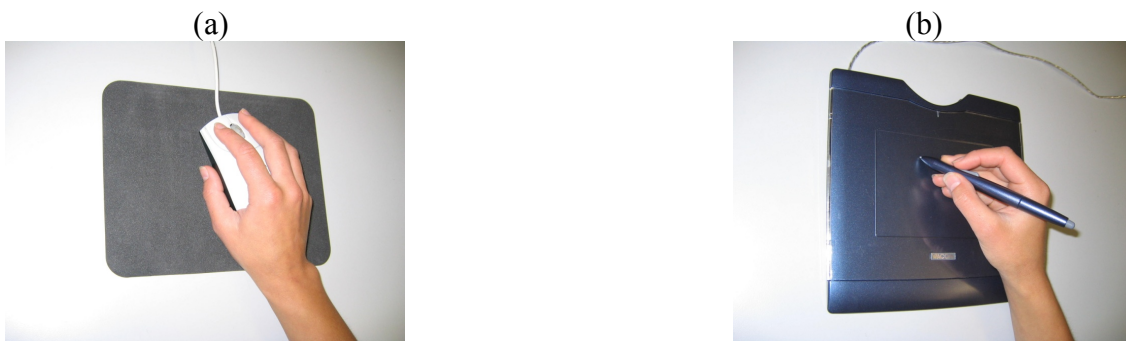


Abbildung 21a, b. Verwendete Eingabegeräte (a) PC-Maus (b) Stift mit Tablett

Für die Zeitmessung in dieser Studie wurde in Anlehnung an Chambers und Brown (2003) eine spezielle Programmklasse, die sowohl die Threading-Komponente berücksichtigte als auch vom High Resolution Timer Gebrauch machte, erstellt und verwendet. Die Zeitmessung (Millisekunden/“ms“) wurde durch das Sichtbarwerden eines Smileys gestartet und durch ein label.click- Ereignis gestoppt. Die Größe eines Smileys (Durchmesser) auf dem Monitor betrug 0.84 cm (0.264 mm Pixelabstand (Monitor) x 32 Pixel (im Visual Studio– Designer)). Die Smileys wurden zufällig, mittels einer modifizierten Random- Funktion und ohne Wiederholung einer Position, in einem Raster (Abbildung 22) dargestellt. Die Aufgabe wurde in 12 Trials durchgeführt. Pro Trial erschienen 150 zu klickende Smileys.

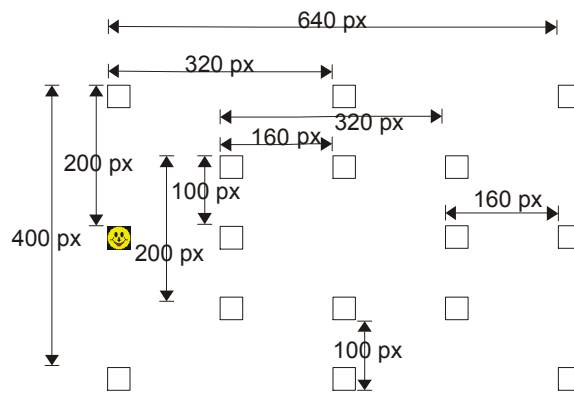


Abbildung 22. Raster der möglichen Smileypositionen und Entfernung in Pixel auf dem Probandenmonitor.

6.2.7 Cross-Over-Versuchsplan

Das verwendete Eingabegerät bildete einen Zwischensubjektfaktor, d.h. die eine Hälfte der Probanden arbeitete ausschließlich mit dem Stift, die andere mit der Maus (siehe Tabelle 4). Eine weitere unabhängige Variable bildete der Faktor Verzögerung, der innerhalb des Versuchsablaufs variiert wurde. Bei jedem Probanden wurde bei der Hälfte der Versuchsaufgaben die visuelle Rückmeldung der mit dem Eingabegerät ausgeführten Bewegungen über den PC-Bildschirm verzögert wiedergegeben. Bei der einen Hälfte der Probanden betraf die Verzögerung die erste Versuchshälfte (Trial 1-6), bei den anderen die zweite Versuchshälfte (Trial 7-12). Die Probanden wurden entsprechend der in einem Vortraining ermittelten Leistung mit Stift und Maus via even odd auf die Zellen verteilt (s. o.).

Tabelle 4
Versuchsplan der Studie Visuelle Verzögerung bei der Arbeit mit Pointing Devices

		Startbedingung	
		mit Verzögerung (111ms)	keine Verzögerung (41ms)
Eingabegerät	Stift	N = 4	N = 4
	Maus	N = 4	N = 4

6.2.8 Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde in Einzelterminen mit 16 Probandinnen durchgeführt. Ein Versuchstermin begann mit einer Aufwärmphase (15 min), in der die aus dem Vortraining bekannte Trainingsaufgabe am PC bearbeitet wurde, je nach Versuchsbedingung mit Maus oder Stift. Im Anschluss wurden der o. g. Fragebogen APS sowie die erste Missempfindungsskala ausgefüllt und ein Tappingtest durchgeführt. Nach dem Platzieren der Elektroden über der Beuger- und Streckermuskulatur beider Unterarme wurden in folgenden Positionen EMG-Messungen durchgeführt: in entspannter Neutralstellung der Arme, in Arbeitsposition (mit dem Eingabegerät in der Hand), unter maximaler Kontraktion der Beuger- bzw. Streckermuskulatur, alles das jeweils für die rechte und die linke Seite. Nach Austeilen und gemeinsamem Lesen der Aufgabeninstruktion begann die Bearbeitung der Versuchsaufgabe: Pro Trial waren 150 in zufälliger Anordnung auf dem Bildschirm erscheinende Objekte (Smileys) durch Bewegen des Eingabegerät-Cursors und Tastendruck wegzuklicken. Nach den ersten sechs Trials wurde die Verzögerungsbedingung geändert und in direktem Anschluss an die Aufgabenbearbeitung ein Ruhe-EMG abgenommen. Außerdem wurde der NASA-TLX zur Beurteilung der durch die bisherige Bearbeitung der Versuchsaufgabe empfundenen Beanspruchung bearbeitet und erneut die subjektive Missempfindung skaliert. Es folgten die Bearbeitung der Trials 7-12 und anschließend dieselben Messverfahren wie nach der ersten Versuchshälfte. Ein Versuchstermin dauerte inklusive Aufwärmphase etwa 90 Minuten (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5

Übersicht über Messungen und Fragebögen während des Versuchsablaufs.

Tätigkeit N =	16			
	Begrüßung/Aufwärmphase/APS Missempfindungsskalierung (vorher-Messung) Tappingtest			
Tätigkeit N =	8		8	
Ruhe-EMG-und MVC-Messung (vor Versuchsbeginn)	Mit Hand in Maushaltung und Neutralstellung		Mit Hand in Stifthaltung und Neutralstellung	
Tätigkeit N =	4	4	4	4
Versuchsaufgabe: Trial 1-6	Mit Maus, unverzögert	Mit Maus, verzögert	Mit Stift, unverzögert	Mit Stift, verzögert
Tätigkeit N =	8		8	
Zeitmessung	Zeit zwischen zwei Mausklicks		Zeit von einem zum nächsten Stifftastendruck	
EMG-Messung (während Aufgabenbearbeitung)	Bei jedem Mausklick		Bei jedem Drücken der Stifftaste	
Ruhe-EMG-Messung (im direkten Anschluss an Aufgabenbearbeitung)	Mit Hand in Maushaltung		Mit Hand in Stifthaltung	
Tätigkeit N =	16			
	Missempfindungsskalierung (2. Messung) NASA-TLX (1. Messung)			
Tätigkeit N =	4	4	4	4
Versuchsaufgabe: Trial 7-12	Mit Maus, verzögert	Mit Maus, unverzögert	Mit Stift, verzögert	Mit Stift, unverzögert
Tätigkeit N =	8		8	
Zeitmessung	Zeit zwischen zwei Mausklicks		Zeit von einem zum nächsten Stifftastendruck	
EMG-Messung (während Aufgabenbearbeitung)	Bei jedem Mausklick		Bei jedem Drücken der Stifftaste	
Ruhe-EMG-Messung (im direkten Anschluss an Aufgabenbearbeitung)	Mit Hand in Maushaltung		Mit Hand in Stifthaltung	
Tätigkeit N =	16			
	Missempfindungsskalierung (3. Messung) NASA-TLX (2. Messung)/Verabschiedung			

6.3 Ergebnisse Studie 1

Die Auswertung der Daten ist in die folgenden Schritte unterteilt: Subjektive Missempfindung, Beanspruchung, Reaktionszeiten, Tastendruckdauer und Muskelaktivität. Die Aggregation der Daten erfolgte in MS Excel 9/11 und MS Access mittels entwickelter Unterprogramme (Makros, mit VBA 6.0 erstellt) und in SPSS 15. Zur inferenzstatistischen Auswertung wurden multivariate / univariate Varianzanalysen (mit und ohne Messwiederholung), t-Tests für abhängige und unabhängige Stichproben sowie nonparametrische Verfahren gerechnet und ggf. Zeitreihenkorrekturen vorgenommen. Die Zeitreihen (Tastendruckdauer, Reaktionszeit, ereigniskorreliertes EMG, Ko-Kontraktionen) wurden in einem ersten Schritt auf Abhängigkeit und Vorherrschen eines Trends geprüft (vgl. Revenstorf, 1979). Die Abhängigkeit der Daten wurde mittels Autokorrelationen und Partialautokorrelationen ermittelt. Wenn sich unterschiedliche Trends signifikant in den einzelnen Kurven abbilden ließen, wurde der Trend mit dem höchsten R^2 durch Subtraktion von der ursprünglichen Zeitreihe eliminiert und die verbleibenden Residuen mit dem Mittelwert der ursprünglichen Zeitreihe addiert. Das α -Fehler-Niveau wurde auf .05 festgelegt und die Effektgrößen in partiellem η^2 und Cohens d dargestellt.

6.3.1 Probanden

Die Versuchsteilnehmerinnen waren Studentinnen unterschiedlicher Fachrichtungen der TU Darmstadt des 1.-6. Semesters im Alter von 20 -30 Jahren ($M = 22.3$, $SD = 2.5$). Die Freizeitnutzung des PCs von 11 Probandinnen lag bei 1-4 Std. und von 5 Probandinnen bei weniger als einer Stunde pro Tag. Zum Arbeiten verbrachten 13 Probandinnen 1-4 Stunden und eine Probandin weniger als eine Stunde pro Tag am PC. Dabei machten zwei Probandinnen keine Angaben. 75% der Probandinnen gaben an, Maus und Tastatur gleichermaßen zu nutzen; 18.6% bevorzugten die Maus. Alle Probandinnen gaben an, Rechtshänder zu sein und seit durchschnittlich 10 Jahren am PC zu arbeiten. Der mittlere Wert des Tappingtests lag bei $M = 106.69$, $SD = 25$ Anschlägen und es gab keinen signifikanten Unterschied zwischen der Maus und der Stift-Gruppe [$F(1) = .380$, $p = .547$].

6.3.2 Missempfindung und Beanspruchung

6.3.2.1 Missempfindungen

Die Daten der Missempfindungsskalierung (0cm= keine, 10cm= starke Empfindung) wurden zusammengefasst zu Empfindungen im Hand/Unterarmbereich und Empfindungen im Oberarm/Schulterbereich (Abbildung 23/24). Zur Überprüfung der Hypothesen (1e, 2e), ob während visueller Verzögerung Missempfindungen zunehmen und diese Zunahme bei der Mausearbeit grösser ist als beim Stift, wurde eine MANOVA mit Messwiederholung (Messwiederholungsfaktor Verzögerungsbedingungen, Zwischensubjektfaktor Eingabegerät) gerechnet. Diese zeigt einen marginal signifikanten Haupteffekt der Verzögerungsbedingungen auf die Missempfindungen [$F(8,7) = 3.547, p = .056$, partielles $\eta^2 = .802$]. Dabei hat die Verzögerungsbedingung einen signifikanten Einfluss auf das Anspannungsempfinden im Unterarm [$F(8,7) = 6.876, p = .020$, partielles $\eta^2 = .329$]. Dieses wird bei beiden Geräten unter 111ms Verzögerung kleiner eingestuft als unter 41ms Verzögerung.

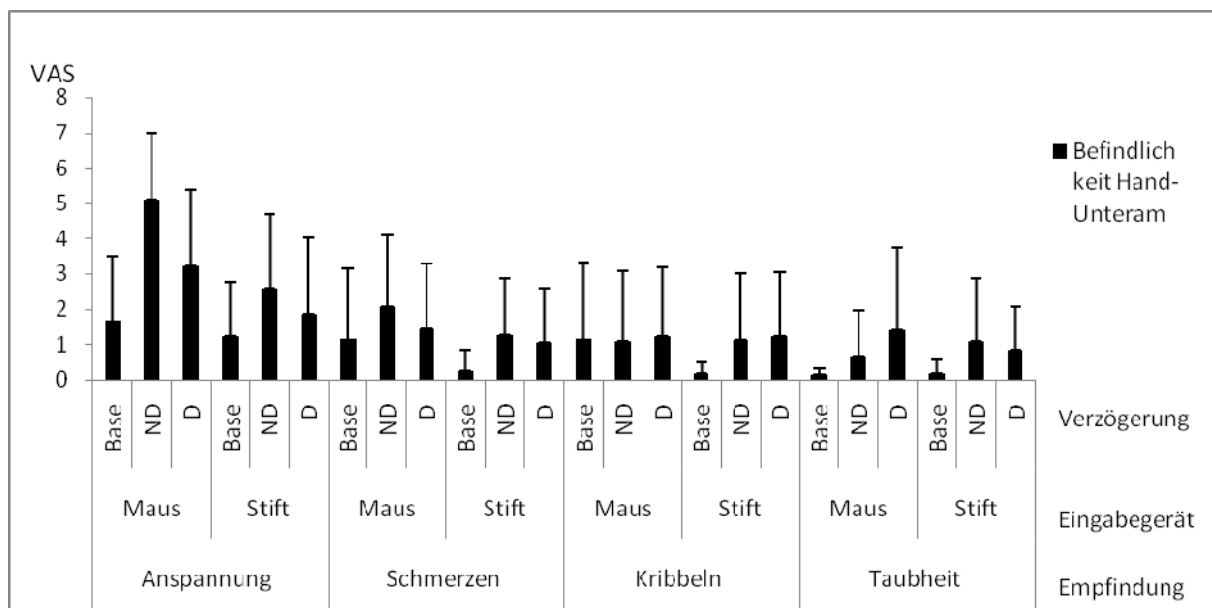


Abbildung 23. Missempfindungen (Anspannung, Schmerzen, Kribbeln und Taubheit) von N=16 Probandinnen bei der Maus oder Stiftarbeit in den Verzögerungsbedingungen (Base = vor der Aufgabenbearbeitung, ND = 41ms Verzögerung, D = 111ms Verzögerung) gemessen mit VAS- Skalen (10cm) im Bereich von Hand/Unterarm (0cm= keine, 10cm= starke Empfindung).

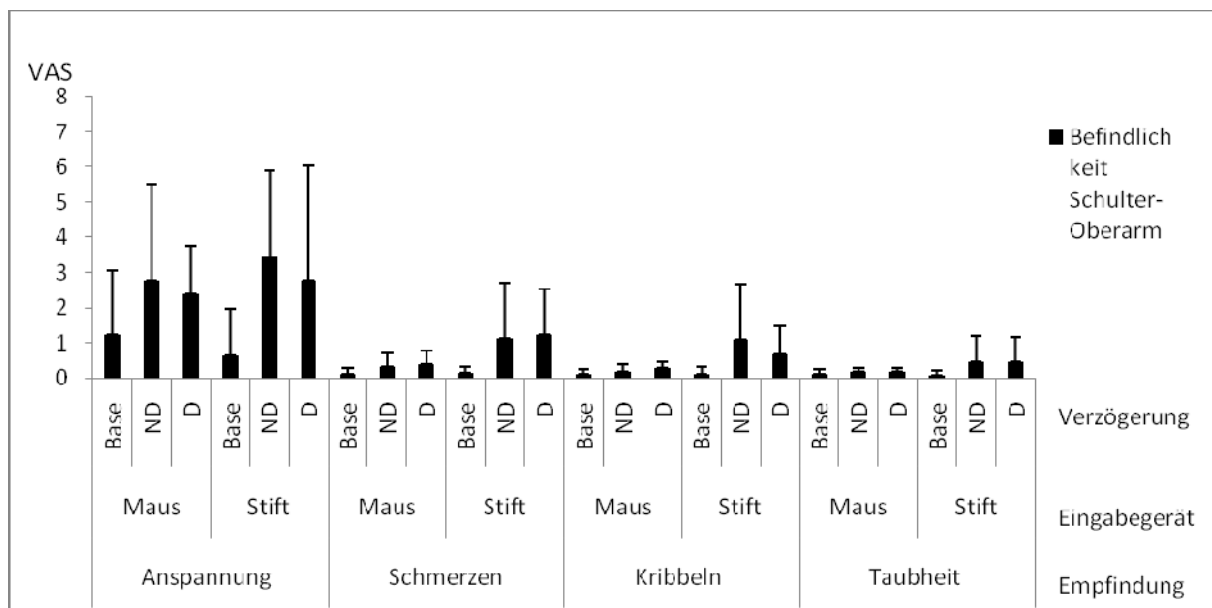


Abbildung 24. Missempfindungen (Anspannung, Schmerzen, Kribbeln und Taubheit) von N=16 Probandinnen bei der Maus oder Stiftarbeit in den Verzögerungsbedingungen (Base = vor der Aufgabenbearbeitung, ND = 41ms Verzögerung, D = 111ms Verzögerung) gemessen mit VAS- Skalen (10cm) im Schulter-, Oberarm- Bereich (0cm= keine, 10cm= starke Empfindung).

Anschließende t-Tests (siehe Tabelle 6) ergeben für die Anspannung im Unterarm höhere Werte in der Verzögerungsbedingung von 111ms während der Mausearbeit als bei der Stiftarbeit. Dabei ist unter Verzögerung eine Reduzierung der Anspannung zu beobachten (0.71cm VAS-Differenz beim Stift, 1.88cm VAS-Differenz bei der Maus). Der Unterschied der Anspannung zwischen Maus und Stift ist in der 41ms Verzögerungsbedingung größer (bei 111ms Verzögerung 1.36cm Differenz zwischen Maus und Stift, bei 41ms Verzögerung 2.54cm Differenz zwischen Maus und Stift). Der Vergleich der Anspannungsdifferenzen von 45ms und 111ms ergibt zwischen Maus- und Stiftarbeit keinen signifikanten Unterschied.

Tabelle 6

Einfluss und Vergleich der Verzögerungsbedingung 41ms (ND) und 111ms (D) auf die mittlere Anspannung (VAS mit SD) im rechten Hand-/ Unterarm- Bereich bei der Maus- oder Stiftarbeit.

Vergleich	VAS (cm)			Diff.	t	p	Cohens d
Stift ND – Stift D	2.58 (2.09)	>	1.86 (2.15)	0.71	.985	.358	.34
Maus ND – Maus D	5.11 (1.89)	>	3.23 (2.16)	1.88	2.785	.027	.93
N=8; df=7; t-Test für abhängige Stichproben							
Vergleich	VAS (cm)			Diff.	t	p	Cohens d
Stift ND – Maus ND	2.58 (2.09)	<	5.11 (1.89)	-2.54	-2.539	.024	.82
Stift D – Maus D	1.86 (2.15)	<	3.23 (2.16)	-1.36	-1.263	.227	.12
N=16; df=14; t-Test für unabhängige Stichproben							

6.3.2.2 Beanspruchung

Um zu überprüfen, ob ein Ansteigen der Beanspruchung (0= keine, 10= starke Beanspruchung) von unverzögerter zu verzögerter Bedingung zu beobachten und dieses Ansteigen bei der Maus größer als beim Stift ist (Abbildung 25), wurde zuerst eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung (Messwiederholungsfaktor Verzögerungsbedingung, Zwischensubjektfaktor Eingabegerät) über die NASA TLX-Variable „Gesamte Beanspruchung“ gerechnet. Der Messwiederholungsfaktor Verzögerungsbedingung zeigte einen signifikanten Haupteffekt [$F(1,14) = 10.819, p = .005$, partielles $\eta^2 = .436$] auf die Beanspruchung. Anschließend t-Tests (siehe Tabelle 7) ergeben für die Verzögerungsbedingungen einen größeren Effekt auf die Beanspruchung bei der Stiftarbeit (1.95 cm NASA TLX-Differenz bei der Stiftarbeit vs. 1.69 cm NASA TLX-Differenz bei der Mausearbeit). Dabei ergibt der Vergleich derselben Verzögerungsstufen zwischen den beiden Eingabegeräten keinen signifikanten Unterschied. Auch die Differenzen der NASA- Skala „Gesamte Beanspruchung“ von 45ms und 111 ms ergeben zwischen Maus- und Stiftarbeit keine signifikanten Unterschiede.

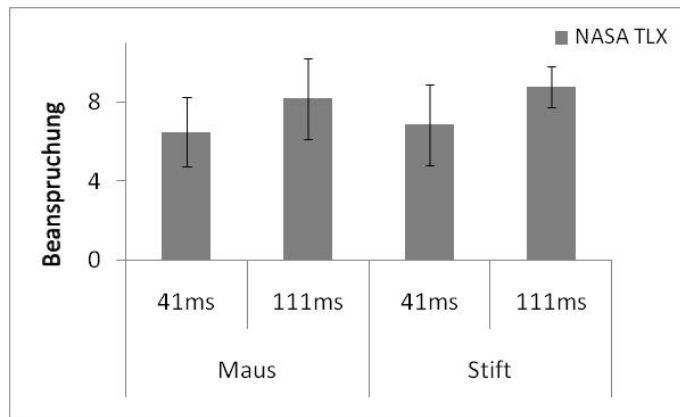


Abbildung 25. NASA-TLX-Werte der gesamten Beanspruchung von N=16 Probandinnen. (0= keine, 10= starke Beanspruchung) bei der Maus-oder Stiftarbeit unter 41ms oder 111ms Verzögerung)

Tabelle 7

Einfluss und Vergleich der Verzögerungsbedingung 41ms (ND) und 111ms (D) auf die „Gesamte Beanspruchung“ (mittlere NASA-Score mit SD) bei der Maus- oder Stiftarbeit.

Vergleich	NASA		Diff.	t	p	Cohens d
Stift ND – Stift D	6.85 (2.03)	< 8.80 (1.04)	-1.95	-2.447	.022	1.21
Maus ND – Maus D	6.50 (1.77)	< 8.19 (2.06)	-1.69	-2.201	.032	.88

N=8; df=7; t-Test für abhängige Stichproben

Vergleich	NASA		Diff.	t	p	Cohens d
Stift ND – Maus ND	6.85 (2.03)	> 6.50 (1.77)	.705	.370	.308	.18
Stift D – Maus D	8.80 (1.04)	> 8.19 (2.06)	1.20	.740	.235	.37

N=16; df=14; t-Test für unabhängige Stichproben

6.3.3 Leistungswerte

6.3.3.1 Reaktionszeiten

Zur Überprüfung der Hypothesen (1d, 2d), ob während visueller Verzögerung die Reaktionszeiten zunehmen und diese Zunahme bei der Mausearbeit größer ist als beim Stift, wurden die Reaktionszeiten in der Zeitreihe von sechs Messzeitpunkten (siehe Abbildung 26a, b) herangezogen. Aufgrund signifikanter Box-Tests wurden zunächst Trends eliminiert, anschließend zwei t-Tests und zwei Mann-Whitney-U- Tests zur Analyse gerechnet. Bei der Verwendung der Maus wird signifikant schneller gearbeitet. Die Arbeit mit der Maus ist unter

41ms Verzögerung 93ms schneller, unter 111ms Verzögerung 97ms schneller als unter Stiftverwendung, bei der auch der Effekt der Verzögerung marginal stärker (154ms Differenz bei der Stiftarbeit, 151ms bei der Mausearbeit) wirkt (Tabelle 8).

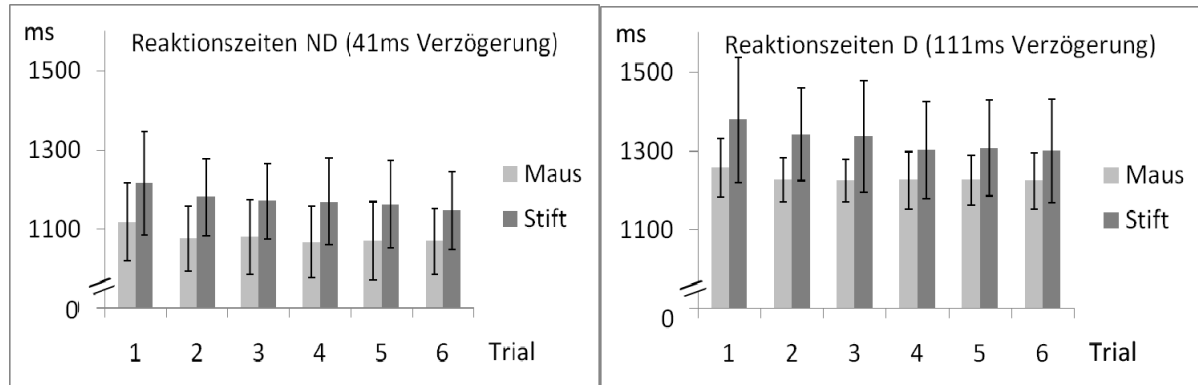


Abbildung 26a, b. Reaktionszeiten unter 41ms und 111ms Verzögerung bei der Arbeit mit der Maus und Stift in den Trials 1-6.

Tabelle 8

Einfluss und Vergleich der Verzögerungsbedingung 41ms (ND) und 111ms (D) auf die Reaktionszeit vom Auftauchen eines Smileys bis zum Wegklicken (Grand Mean Millisekunden mit SD) bei der Maus- oder Stiftarbeit.

Vergleich	ms			Diff.	t	<i>p</i>	<i>Cohens d</i>
Stift ND – Stift D	1173.32 (1.14)	<	1327.76 (7.01)	-154.44	-50.346	.000	30.75
Maus ND – Maus D	1079.40 (5.15)	<	1230.57 (5.55)	-151.16	-136.622	.000	28.21

N=6; df=5; t-Test für abhängige Stichproben

Vergleich	ms		Mann Withney U	Wilcoxon W	z	p	Cohens d
Stift ND – Maus ND	1173.32 (1.14)	> 1079.40 (5.16)	0	21	-2.882	.002	25.13
Stift D – Maus D	1327.76 (7.01)	> 1230.57 (5.55)	0	21	-2.882	.002	15.37

N=12; Mann-Whitney-U-Test

Der Vergleich der Reaktionszeitdifferenzen von 45ms und 111ms ergibt zwischen Maus- und Stiftarbeit keine signifikanten Unterschiede.

6.3.3.2 Tastendruckdauer

Zur Überprüfung der Tastendruckdauer wurde der Median des über die Tastenanschläge gemittelten Trigger-Signals eines Bedingungskombinations- Trials (z. B. Maus mit 41ms Verzögerung in Trial 1) einer Probandin herangezogen und dieser über alle Probandinnen und für jeden Trial gemittelt. Diese vier Zeitreihen (Maus mit 41ms Verzögerung, Stift mit 41ms Verzögerung, Maus mit 111ms Verzögerung und Stift mit 111ms Verzögerung), jeweils bestehend aus Trial 1-6, wurden nach Trends analysiert und diese ggf. eliminiert. Anschließend wurden zum Vergleich der Verzögerungsbedingungen zwei t-Tests über die Mittelwerte der Zeitreihen von Maus und Stift gerechnet (siehe Tabelle 9). Der Unterschied zwischen 41ms und 111ms war innerhalb der Maus und dem Stift nur marginal signifikant, die Tastendruckdauer an sich (ca. 97ms/98ms Tastendruckdauer bei Stifterarbeit vs. ca.86ms/87ms bei der Mausearbeit) sowie der Effekt der Verzögerung bei der Maus tendenziell höher (1.17ms Differenz bei Stifterarbeit vs. 1.26ms bei der Mausearbeit).

Tabelle 9

Einfluss und Vergleich der Verzögerungsbedingung 41ms (ND) und 111ms (D) auf die Tastendruckdauer (Grand Mean in Millisekunden mit SD über je sechs Trials) bei der Maus- oder Stifterarbeit.

Vergleich	ms		Diff.	t	<i>p</i>	<i>Cohens d</i>	
Stift ND – Stift D	96.75 (0.62)	<	97.92 (1.56)	-1.17	-1.690	.060	1.07
Maus ND – Maus D	85.82 (1.95)	<	87.08 (0.70)	-1.26	-1.494	.083	0.95

N=6 (Trials); df=7; t-Test für unabhängige Stichproben

6.3.4 Muskelaktivität

6.3.4.1 Ruhe- EMG

Die für jeden Muskel über je 10 Sekunden erhobenen Ruhe-EMG- Daten bestanden pro Messung aus 5000 Einzelwerten pro Muskel und wurden über alle Probanden und Bedingungen in MS Access aggregiert (siehe Abbildungen 27, 28). Dabei wurden die Einzelwerte gleichgerichtet und alle Werte, die größer als 50 Mikrovolt waren, durch jeweils einen Wert von 50 μ Volt ersetzt. Danach wurde pro Messung und Kanal ein Mittelwert berechnet und als Maß der Erholung die Zeitkonstante ermittelt. Diese ist ein hypothetischer Zeitwert, der die Dauer angibt, nach der sich der Ausgangswert der Muskelspannung bei linearer

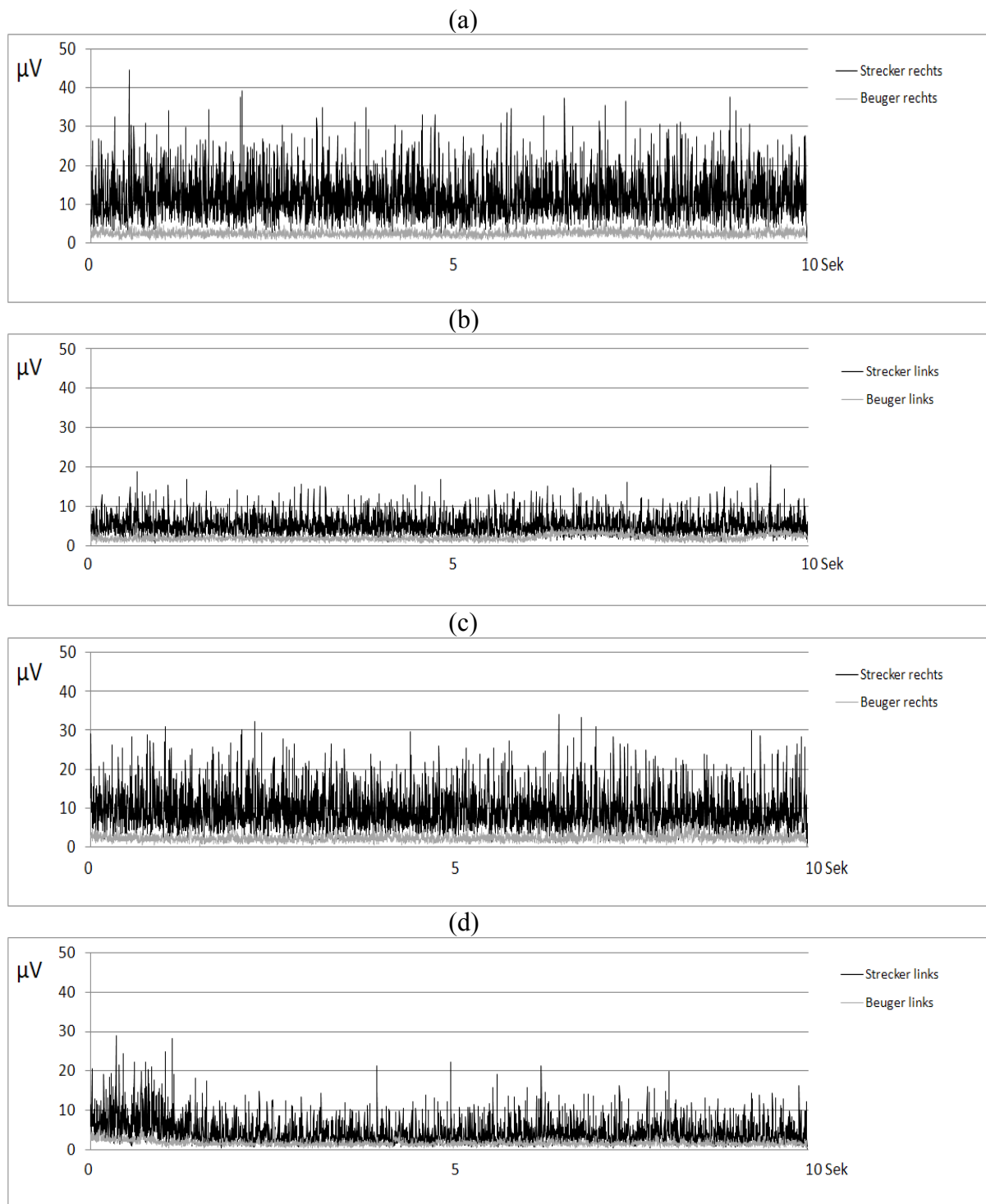


Abbildung 27a-d. Grand Means des Ruhe-EMG von rechter (a, c) und linker (b, d) Beuger- und Strecker- Muskulatur bei der Mausearbeit während 41ms Verzögerung (a, b) und 111ms Verzögerung (c, d)

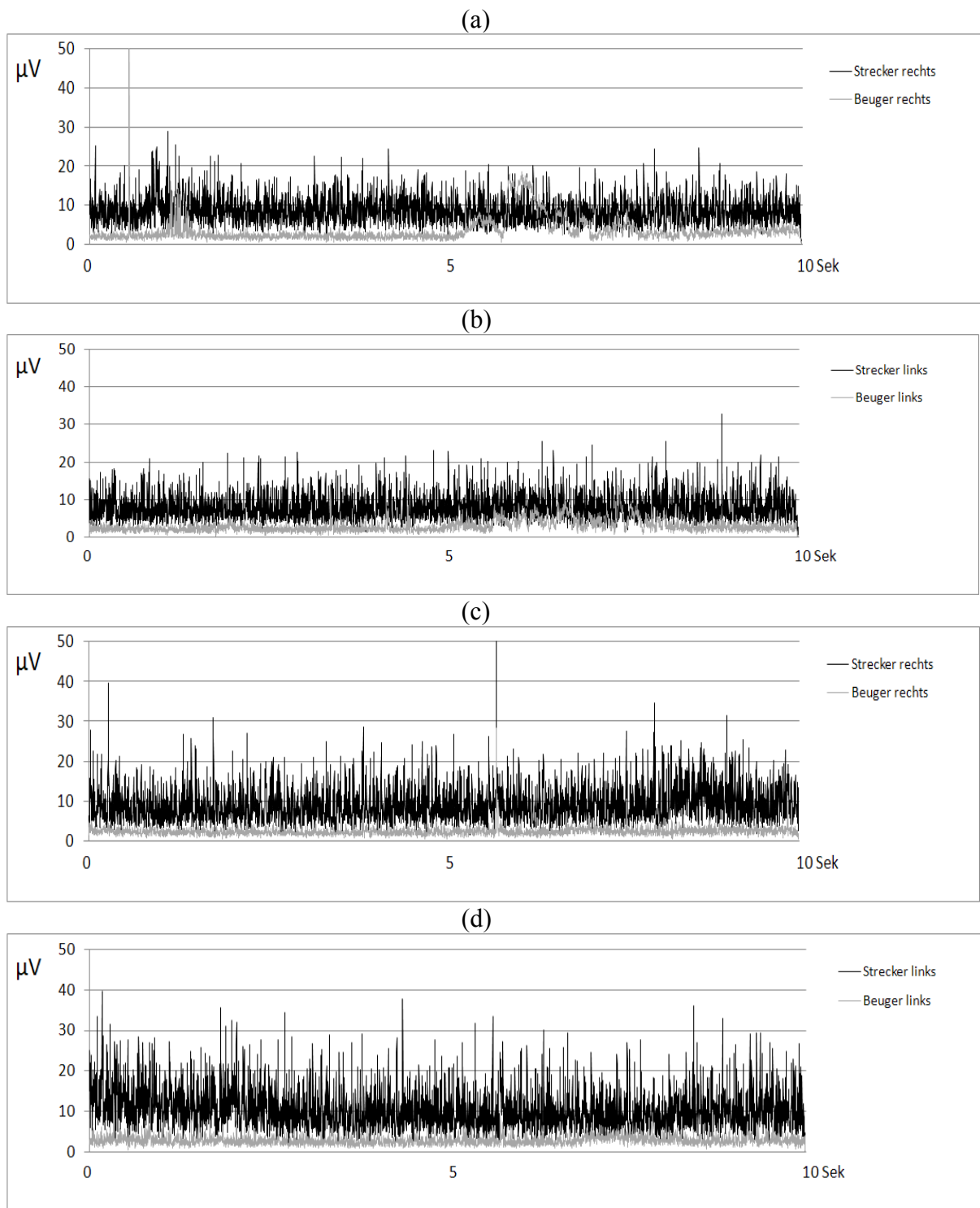


Abbildung 28a-d. Grand Means des Ruhe-EMG von rechtem (a, c) und linkem (b, d) Beuger und Strecker bei der Stiftarbeit während 41ms Verzögerung (a, b) und 111ms Verzögerung (c, d).

Extrapolation halbiert hat (analog zur Halbwertszeit) und stellt ein Maß der Steigung der EMG-Kurve dar. Diese Konstanten wurden ebenfalls gemittelt und sind in Tabelle 10 mit den mittleren μV des EMG dargestellt. Deskriptiv ist eine erhöhte Aktivität im rechten Strecker nach der Mausearbeit in der 41ms Verzögerungsbedingung sowie nach der Stiftarbeit im linken Strecker und Beuger zu beobachten. Da jedoch motorische Artefakte in den Rohdaten dreier von vier Personen in der Stift Verzögerungs- Bedingung sowie in der Bedingung Stift Ruhestellung entdeckt wurden, wurde auf eine inferenzstatistische Auswertung verzichtet.

Tabelle 10

Zeitkonstanten und mittleres EMG bei Ruheabnahme

Bedingung/ Muskel	Gerät	Mittlere Zeitkonstanten in Sekunden im Ruhe-EMG		Mittlere Muskelaktivität in μV im Ruhe-EMG		
		M	SD	M	SD	N
Base Strecker Rechts	ohne	157.71	654.38	2.64	0.75	16
	Maus	22.19	46.19	17.90	7.12	8
	Stift	-60.12	231.29	14.94	6.12	8
ND Strecker Rechts	Maus	-606.52	1832.13	9.55	4.78	8
	Stift	-190.31	399.41	9.14	4.31	8
D Strecker Rechts	Maus	-55.85	66.30	13.03	6.15	8
	Stift	31.49	65.17	8.71	3.35	8
Base Beuger Rechts	ohne	18213.34	70537.32	1.53	0.40	16
	Maus	-839.52	2457.33	2.83	0.89	8
	Stift	9.10	37.69	5.44	4.38	8
ND Beuger Rechts	Maus	6.45	68.59	2.37	0.95	8
	Stift	37.41	100.71	2.39	0.91	8
D Beuger Rechts	Maus	53.36	123.82	2.22	0.68	8
	Stift	460.77	1202.01	3.52	3.08	8
Base Strecker Links	ohne	-20.49	123.69	1.79	0.65	16
	Maus	15.18	56.23	6.36	3.53	8
	Stift	652.64	1635.61	14.14	7.26	8
ND Strecker Links	Maus	4.77	61.54	4.35	3.14	8
	Stift	36.07	87.78	10.43	4.90	8
D Strecker Links	Maus	-281.36	679.24	5.62	2.66	8
	Stift	84.31	159.24	7.99	3.36	8
Base Beuger Links	ohne	-2.86	47.06	1.24	0.37	16
	Maus	30.16	70.01	3.38	1.97	8
	Stift	24.88	108.19	3.64	2.70	8
ND Beuger Links	Maus	31.45	141.40	1.61	0.69	8
	Stift	-195.09	572.37	2.82	1.06	8
D Beuger Links	Maus	-1756.97	4890.58	1.71	0.61	8
	Stift	54.75	121.11	2.98	1.60	8

6.3.4.2 Ereigniskorreliertes EMG

Die Auswertung des ereigniskorrelierten EMG erfolgte durch Aggregation der Daten, Suche nach gültigen Tastenanschlägen (Eliminierung von zu kurzen oder zu langen Pre-Triggerphasen), Analyse der Zeitreihen, ggf. Beseitigung der seriellen Abhängigkeit und Berechnung mehrerer Wilcoxon und Mann-Whitney-U- Tests.

Aggregiert man nach der Gleichrichtung den Verlauf (340ms) der Muskelaktivität eines Muskels über alle Tastendrucke (jeweils 900 pro Bedingung) und mittelt diese über alle Pbn, erhält man den mittleren Muskelaktivitätsverlauf dieses Muskels in einer bestimmten Bedingungskombination. Dies wurde für alle Muskeln durchgeführt (siehe Abbildung 29a-h). Zur weiteren EMG- Auswertung wurden nur die Daten von 140ms bis 0ms vor dem Tastendruck herangezogen, da spätere zeitliche Verläufe nicht mehr auf ein eindeutiges Ereignis zurückführbar sind („time-jitter“). Dies ist durch den ansteigenden Triggerverlauf (unterschiedliche Tastendruckdauer) erkennbar. In Abbildung 30a-d sind die Mittelwerte der Zeitreihen im Bereich von 140ms bis 0ms vor dem Tastendruck dargestellt.

Die aggregierten, gleichgerichteten und gemittelten ereigniskorrelierten EMG-Daten des Bereiches 140ms-0ms vor dem Tastdruck wurden in einem ersten Schritt auf Abhängigkeit und Vorherrschen eines Trends geprüft. Die Abhängigkeit der Daten wurde mittels Autokorrelationen und Partialautokorrelationen überprüft. Nach Identifizierung von Trends wurden diese eliminiert (durch Subtraktion von der ursprünglichen Zeitreihe und anschließender Addition der verbleibenden Residuen zu dem Mittelwert der ursprünglichen Zeitreihe). Um zu überprüfen, ob ein Ansteigen der muskulären Aktivität im Strecker und Beuger von unverzögerter zu verzögerter Bedingung zu beobachten und dieses Ansteigen bei der Maus größer als beim Stift ist, wurden mit diesen korrigierten Zeitreihen aufgrund signifikanter Box- und Levene- Tests mehrere Wilcoxon-Tests gerechnet. Der Vergleich der Wirkung von 41ms und 111ms Verzögerung über beide Eingabegeräte ergab signifikante Veränderungen der muskulären Aktivität in beiden Armen und ist in Tabelle 11 dargestellt.

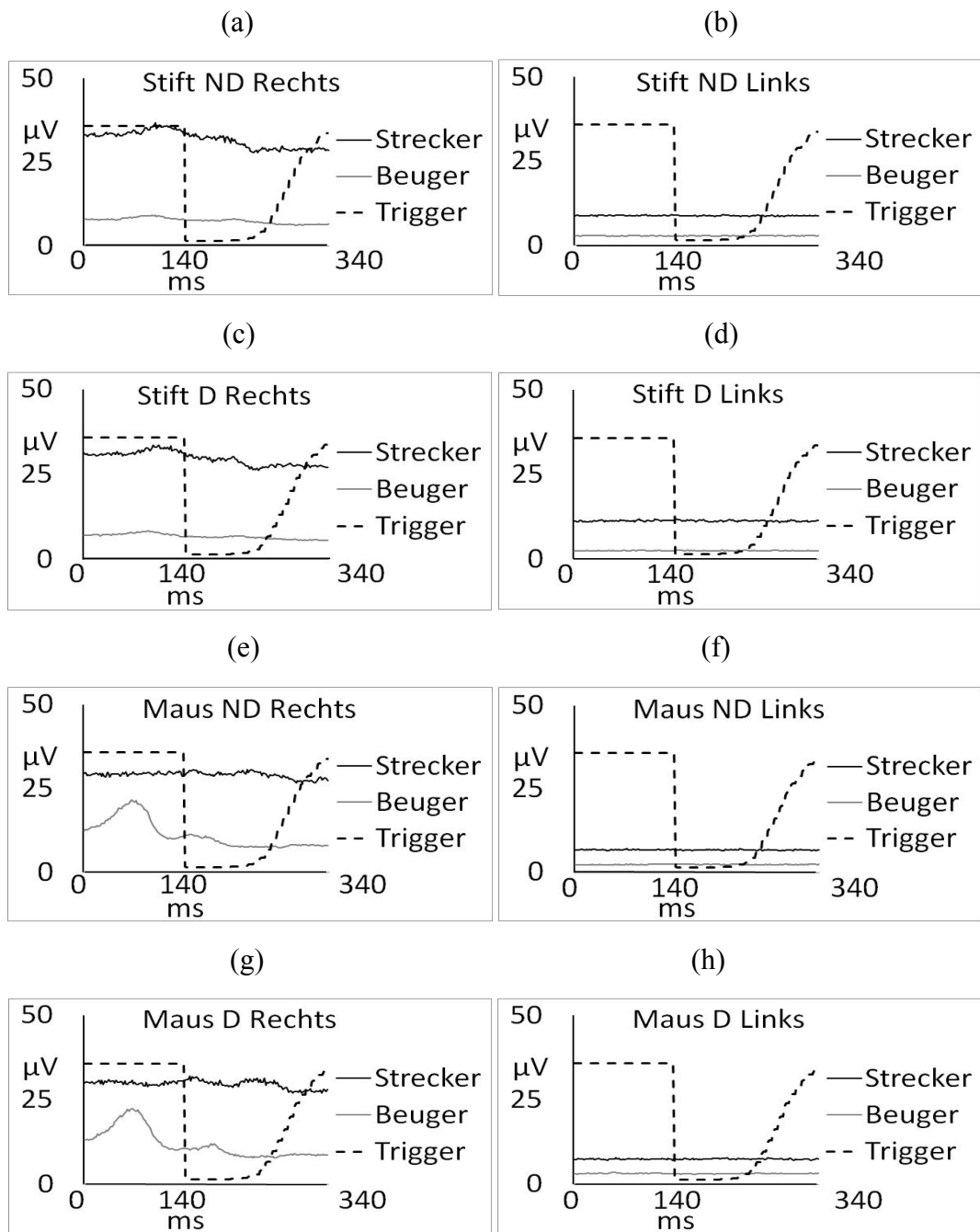


Abbildung 29a-h. Ereigniskorreliertes Grand Mean-EMG von Strecker und Beuger des rechten und linken Unterarms inklusive des Trigger-Signals (gestrichelte Linie) in allen Bedingungskombinationen (ND= 41ms Verzögerung, D= 111ms Verzögerung). Die Stift- oder Maus-Taste wurde bei 140 ms gedrückt und unterschiedlich lang gedrückt gehalten.

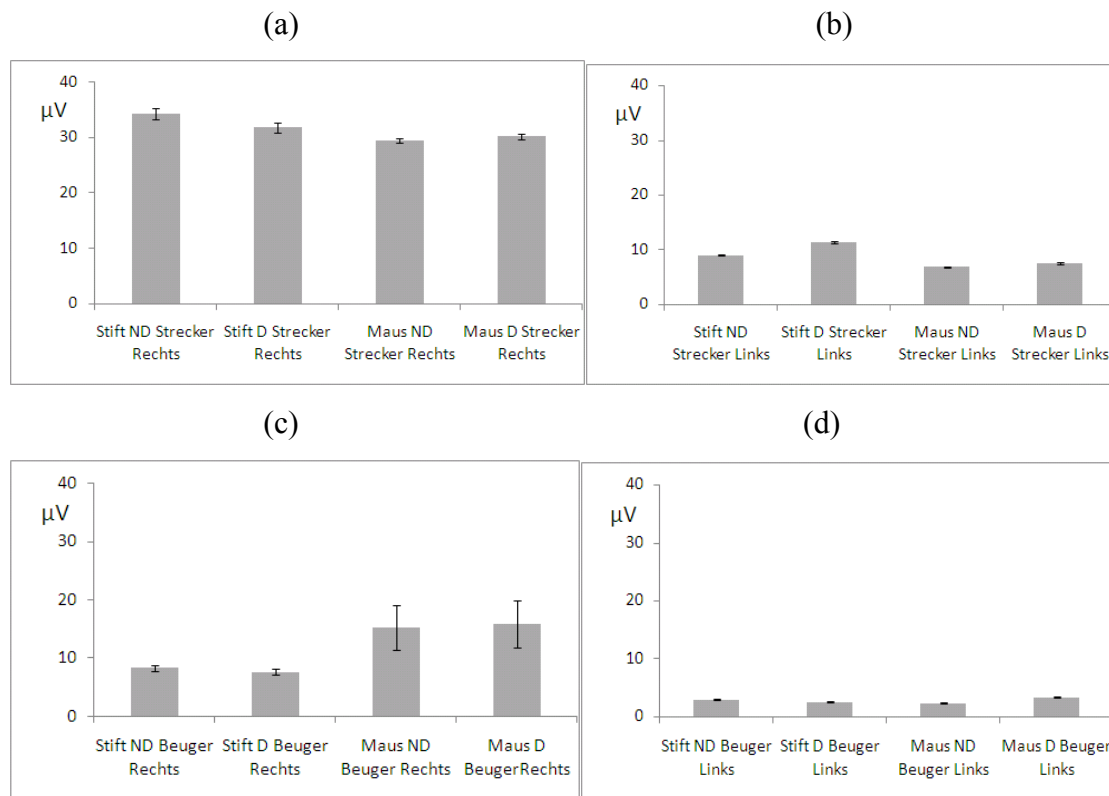


Abbildung 30a-d. Mittlere Grand Mean EMG-Aktivität der rechten und linken Beuger- und Strecker- Muskulatur 140ms bis 0ms vor dem Tastendruck in den Bedingungen ND (41ms Verzögerung) und D (111ms Verzögerung).

Tabelle 11

Vergleich der Grand Mean-Strecker und -Beuger-Aktivität (μV) Zeitreihe 140ms vor dem Tastendruck im rechten und linken Unterarm zwischen 41ms Verzögerung (ND) und 111ms Verzögerung (D).

Vergleich	μV		Differenz	z	p	Cohens d
Strecker Links (ND vs. D)	8.12 (1.94)	< 9.72 (2.88)	-1.60	-10.265	.000	.65
Beuger Links (ND vs. D)	2.83 (5.11)	< 3.04 (0.74)	-0.21	-2.317	.020	.05
Strecker Rechts (ND vs. D)	33.62 (7.79)	> 32.62 (8.52)	1.00	-4.753	.000	.12
Beuger Rechts (ND vs. D)	12.18 (5.00)	> 12.14 (5.53)	0.04	-.994	.320	.007

N= 140, Wilcoxon-Test.

Signifikante Unterschiede sind sowohl im linken Strecker (1.6 μV Erhöhung von 41ms zu 111ms Verzögerung) und Beuger (0.2 μV Erhöhung von 41ms zu 111ms Verzögerung) als auch im rechten Strecker (1 μV Abnahme von 41ms zu 111ms Verzögerung) über beide Eingabegeräte zu beobachten. Zur Überprüfung der Störanfälligkeit der Maus gegenüber dem Stift wurde zunächst der Vergleich von 41ms Verzögerung und 111ms Verzögerung für beide Eingabegeräte getrennt durchgeführt (Tabellen 12, 13).

Tabelle 12

Vergleich der Grand Mean-Strecker und -Beuger-Aktivität (μV) Zeitreihe 140ms vor dem Tastendruck mit der Maus im rechten und linken Unterarm zwischen 42ms Verzögerung (ND) und 111ms Verzögerung (D).

Vergleich	μV		Differenz	z	p	Cohens d
Strecker Links (ND vs. D)	6.78 (0.10)	< 7.48 (0.13)	-0.70	-7.271	.000	6.03
Beuger Links (ND vs. D)	2.44 (0.52)	< 3.43 (0.69)	-0.99	-7.271	.000	1.62
Strecker Rechts (ND vs. D)	30.99 (6.83)	< 31.78 (6.91)	-0.79	-4.626	.000	.11
Beuger Rechts (ND vs. D)	15.67 (4.72)	< 16.28 (4.88)	-0.61	-5.229	.000	.12

N=70, Wilcoxon-Test.

Tabelle 13

Vergleich der Grand Mean-Strecker und -Beuger-Aktivität (μV) Zeitreihe 140ms vor dem Tastendruck mit dem Stift im rechten und linken Unterarm zwischen 42ms Verzögerung (ND) und 111ms Verzögerung (D).

Vergleich	μV		Differenz	z	p	Cohens d
Strecker Links (ND vs. D)	9.46 (2.00)	< 11.95 (2.56)	-2.49	-7.271	.000	1.08
Beuger Links (ND vs. D)	3.23 (0.93)	> 2.65 (0.58)	0.58	-5.252	.000	.74
Strecker Rechts (ND vs. D)	36.25 (7.86)	> 33.46 (7.37)	2.79	-7.260	.000	.36
Beuger Rechts (ND vs. D)	8.70 (1.86)	> 8.01 (1.73)	0.69	-7.160	.000	.38

N= 70, Wilcoxon-Test.

Der Vergleich der Verzögerungsbedingungen zeigt bei der Maus ein signifikantes Ansteigen (zwischen 0.61 bis 0.99 μV) der Flexor- und Extensor-Muskelaktivität beider Arme. Bei der Stiftarbeit kommt es im linken Strecker zu einer Erhöhung der Muskelaktivität (2.49 μV), jedoch auch zu einer Abnahme der Muskelaktivität im linken Beuger (0.58 μV),

rechten Strecker ($2.79\mu\text{V}$) und rechten Beuger ($0.69\mu\text{V}$). Aufgrund der unterschiedlichen Prozesse (Zunahme des EMG bei Mausearbeit während 111ms Verzögerung vs. Abnahme des EMG bei Stiftarbeit bei 111ms Verzögerung) wurde auf den Vergleich der Differenzwerte von 41ms und 111ms zwischen den Eingabegeräten verzichtet.

6.3.5 Ko-Kontraktionen

Zur Berechnung der Ko-Kontraktionen im Zeitfenster 140ms vor jedem Tastendruck wurde sowohl die im Theorieteil entwickelte Formel 7 (KKI_PAM) verwendet als auch auf die Berechnung der gemeinsamen Fläche (KKI_F) unter Agonist und Antagonist nach Frost et al. (1997) zurückgegriffen (Formel siehe Abbildung 31a, b).

(a)

$$\text{KKI_F (Ko-Kontraktionsindex nach Frost)} = \min(F_E, F_F)$$

(b)

$$\text{KKI_PAM (Ko-Kontraktionsindex nach Pain Adaption Model)} =$$

$$\frac{1}{7000} * \frac{\min(F_E, F_F)^2}{\max(F_E, F_F) - \min(F_E, F_F)}$$

mit

F_E = Fläche unter Extensor

F_F = Fläche unter Flexor

Abbildung 31a, b. Formel zur Berechnung Ko-Kontraktionen mit der gemeinsamen Fläche von Agonist und Antagonist (a) analog zu Frost et al. (1997) und (b) mittels KKI_PAM.

6.3.5.1 EMG Ko-Kontraktionen nach Frost et al.

Die Formeln in Abbildung 31a wurden auf die pro Probandin in den sechs Trials gemittelten ereigniskorrelierten EMG Strecker- und Beuger- Kurven im Zeitfenster 140ms vor dem Tastendruck angewendet. Anschließend wurden die Grand Means der Ko-Kontraktionen 140ms vor dem Tastendruck aller Pbn über sechs Trials errechnet (Abbildung 32a, b).

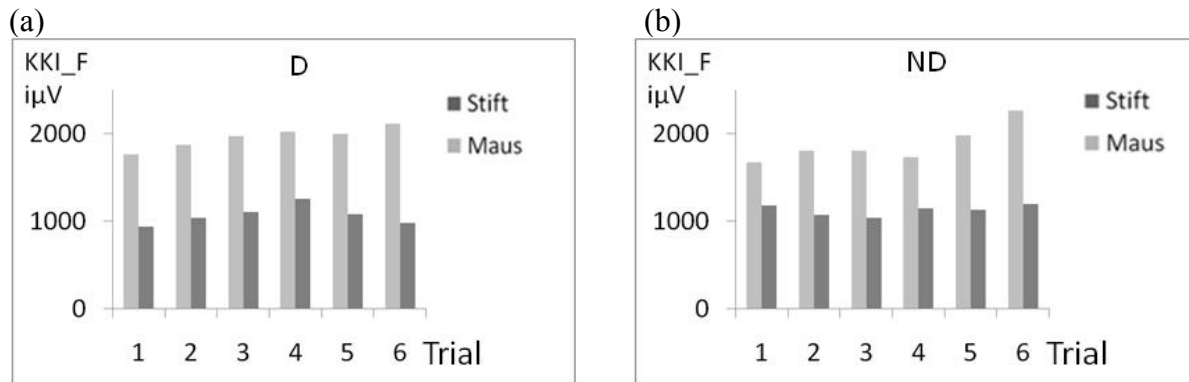


Abbildung 32a ,b. Grand Mean Ko-Kontraktionsindex nach Frost et al. 140ms bis 0ms vor dem Tastendruck in 6 Trials mit N=8 Pbn bei Mausklick und N= 8 Pbn beim Stiftklick und unter Bedingung ND (41ms Verzögerung) und Bedingung D (111ms Verzögerung).

Um zu überprüfen, ob das Auftreten von muskulären Ko-Kontraktionen von unverzögerter zu verzögerter Bedingung zu beobachten und dieses Auftreten bei der Maus größer als beim Stift ist, wurde jede der vier Zeitreihen (zu je sechs Trials) auf Trends und Autokorrelationen überprüft und gegebenenfalls bereinigt. Zur Analyse des Einflusses der Verzögerung und der Eingabegeräte auf die Ko-Kontraktionen wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung (Messwiederholungsfaktor Verzögerung, Zwischensubjektfaktor Eingabegerät) gerechnet. Diese ergibt einen signifikanten Haupteffekt von Eingabegerät [$p < .001$, $F(1) = 543.739$, partielles $\eta^2 = .965$] und eine marginal signifikante Interaktion von Eingabegerät und Verzögerung [$p = .060$, $F(1) = 3.987$, partielles $\eta^2 = .166$] auf den KKI_F im Pre-Triggerbereich. Die Zeit vor dem Tastendruck zeigt bei der Maus unter 41ms Verzögerung eine Ko-Kontraktion von $M = 1879.66$, $SD = 112.47 \mu V$, welche bei 111ms Verzögerung um $79.35 \mu V$ auf $M = 1959.01$, $SD = 21.66 \mu V$ ansteigt. Bei der Stiftarbeit nimmt die Ko-Kontraktion unter 111ms Verzögerung gegenüber der von 41ms von $M = 1128.92$, $SD = 61.61 \mu V$ um $61.26 \mu V$ auf $M = 1067.66$, $SD = 113.31 \mu V$ ab (siehe Tabelle 14). Die Vergleiche der Differenzen der Ko-Kontraktionen nach KKI_F bei der Maus- und Stiftarbeit zwischen jeweils 41ms und 111ms Verzögerung ergaben keine signifikanten Unterschiede.

Tabelle 14

Grand Mean (pro Pb über alle Bedingungen und über alle Pbn) der muskulären Ko-Kontraktionen nach KKI_F 140ms vor dem Tastendruck berechnet als gemeinsame Fläche von Strecker und Beuger- Muskulatur, jeweils für Stift und Maus in den Bedingungen ND (41ms Verzögerung) und D (111ms Verzögerung)

Eingabegerät	Bedingung	M	SD	N
Maus	D	1959.01	21.66	8
	ND	1879.66	112.47	8
Stift	D	1067.66	113.31	8
	ND	1128.92	61.61	8

6.3.5.2 EMG Ko-Kontraktionen nach KKI_PAM.

Zur Überprüfung der Ko-Kontraktionen wurde analog zur Formel von KKI_F mit Hilfe der Formel nach KKI_PAM verfahren. Dabei zeigte die ANOVA zwei signifikante Haupteffekte von Eingabegerät [$p < .001$, $F(1) = 141.565$, partielles $\eta^2 = .876$] und Verzögerung [$p < .012$, $F(1) = 7.721$, partielles $\eta^2 = .279$] auf den KKI_PAM 140ms vor dem Tastendruck sowie eine marginal signifikante Interaktion der Faktoren [$p = .058$, $F(1) = 4.049$, partielles $\eta^2 = .168$]. Die Zeit vor dem Tastendruck zeigt bei der Maus höhere Ko-Kontraktionen, die bei 111ms Verzögerung bei Maus stark und bei Stift kaum zunehmen (siehe Tabelle 15). Der Vergleich der Differenzen von Ko-Kontraktionen nach KKI_PAM von 45ms und 111ms zwischen Maus und Stiftarbeit mittels Mann-Whitney-U-Test (aufgrund fehlender Varianzhomogenität) ergibt einen signifikant höheren Ko-Kontraktionsunterschied bei der PC-Maus (siehe Tabelle 16).

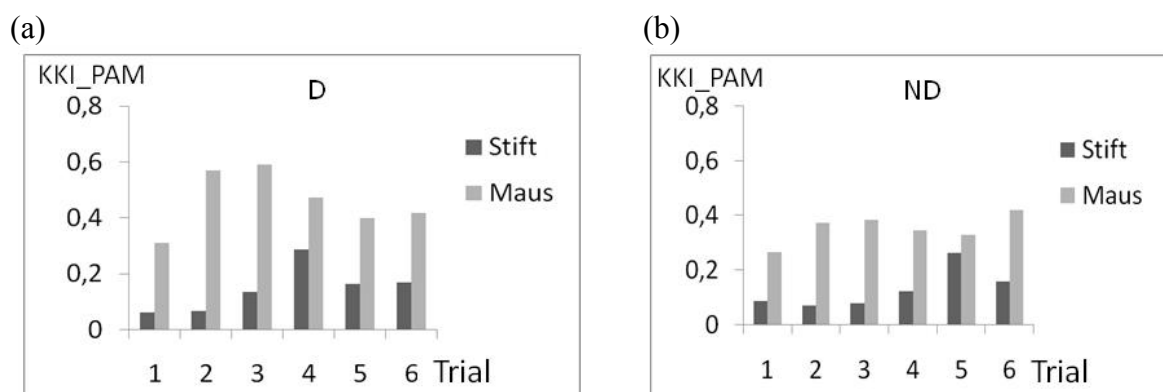


Abbildung 33a, b. Grand Mean Ko-Kontraktionsindex nach KKI_PAM 140ms vor dem Tastendruck in 6 Trials mit N=8 Pbn bei Mausklick und N= 8 Pbn beim Stiftklick und unter ND (41ms Verzögerung) und D (111ms Verzögerung).

Tabelle 15

Mittlere Grand Means der muskulären Ko-Kontraktionen nach KKI_PAM 140ms vor dem Tastendruck) in den Bedingungen ND (41ms Verzögerung) und D (111ms Verzögerung) bei der Stift- bzw. Maus-Arbeit.

Eingabegerät	Bedingung	M	SD	N
Maus	D	0.4606	.0075	8
	ND	0.3528	.0035	8
Stift	D	0.1476	.0824	8
	ND	0.1303	.0728	8

Tabelle 16

Vergleich der Differenzen der Ko-Kontraktionsindizes nach KKI_PAM zwischen 41ms (ND) und 111ms (D) Bedingung von Maus und Stift.

Vergleich	KKI_PAM		Mann Withney U	Wilcoxon W	z	p	Cohens d
Differenzen von Stift (ND, D) & Maus (ND, D)	0.059 (0.061)	0.107 (0.009)	7	28	-1.761	.039	1.20

N=6 (Trials), Mann-Whitney-U-Test

6.3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Aufgrund möglicher Alpha-Fehler-Kumulation könnten bei 31 Testungen mindestens zwei (gerundet) Testergebnisse zufällig zustande gekommen sein. Deswegen wird das Alpha-Fehler-Niveau nach Bonferroni korrigiert. Es ergibt sich bei 31 Testungen ein gerundetes α -Niveau von $.05 / 31 = .002$. Dies ist in der nachfolgenden Zusammenfassung der Ergebnisse enthalten (Tabelle 17).

Tabelle 17

Zusammenfassung (Hypothese, Signifikanz mit / ohne Bonferroni- Korrektur und Kommentare) der Ergebnisse der Studie 1.

Hypothese	$p < .05$	$p < .002$	Kommentar
Ipsilaterales EMG im Agonist unterscheidet sich unter Verzögerung	Ja	Ja	Vergleich der einzelnen Geräte ergibt bei Maus Ansteigen ipsi- ($0.61\mu V$) wie kontralateral ($0.99\mu V$), beim Stift ein Abfallen ipsi- ($0.69\mu V$) wie kontralateral ($0.58\mu V$)
Ipsilaterales EMG im Agonist unterscheidet sich unter Verzögerung: Maus > Stift	-	-	
Ipsilaterales EMG im Antagonist unterscheidet sich unter Verzögerung	Ja	Ja	Antagonist steigt bei Mausearbeit um $0.79\mu V$ ipsilateral und $0.70\mu V$ kontralateral an, unter Stiftarbeit fällt er ipsilateral um $2.79\mu V$ ab und steigt um $2.49\mu V$ kontralateral an.
Ipsilaterales EMG im Antagonist unterscheidet sich unter Verzögerung: Maus > Stift	-	-	
Ansteigen der Ko-Kontraktionen nach KKI_F unter Verzögerung	Nein	Nein	Signifikanter Einfluss der Ko-Kontraktion durch Eingabegerät. Höhere Ko-Kontraktionen bei Maus.
Ansteigen der Ko-Kontraktionen nach KKI_F unter Verzögerung Maus > Stift	Nein	Nein	Nicht signifikanter Anstieg bei Maus Abfallen bei Stift.
Ansteigen der Ko-Kontraktionen nach KKI_PAM unter Verzögerung	Ja	Nein	Signifikanter Einfluss von Eingabegerät und Verzögerung. Anstieg bei Maus und Stift
Ansteigen der Ko-Kontraktionen nach KKI_PAM unter Verzögerung Maus > Stift	Ja	Nein	Differenz der Ko-Kontraktionen innerhalb der Mausearbeit größer (0.107) als innerhalb der Stiftarbeit (0.059)
Zunahme der Missempfindungen	Ja	Nein	Signifikant weniger Anspannung von $41ms$ zu $111ms$ Verzögerung nur bei Maus ($1.88cm$). Unter $41ms$ weniger Anspannung bei Stift als bei Maus ($2.54cm$)
Zunahme der Missempfindungen Stift > Maus	Nein	Nein	-
Zunahme der Beanspruchung	Ja	Nein	Signifikante Zunahme der Beanspruchung bei Stift ($1.95cm$ NASA TLX) und bei Maus ($1.69cm$ NASA TLX)
Zunahme der Beanspruchung Maus > Stift	Nein	Nein	-
Zunahme der Reaktionszeit	Ja	Ja	Bei Stift und Maus signifikante Zunahme. Maus ist generell schneller ($93ms$ unter $41ms$ Verzögerung// $97ms$ unter $111ms$ Verzögerung) als der Stift.
Zunahme der Reaktionszeit Maus > Stift	Nein	Nein	-
Veränderung der Tastendruckdauer	Nein	Nein	Marginal signifikanter Unterschied. $111ms$ Verzögerung bewirkt längeres Drücken, dies ist bei der Mausearbeit tendenziell höher.

6.4 Diskussion Studie 1

Die Studie hatte die Aufgabe zu erklären, wie sich visuelle Verzögerung auf die motorische Kontrolle und Leistung bei der Navigation mit dem Stift und der PC-Maus sowie auf muskuläre und subjektive Parameter auswirkt.

6.4.1 Subjektive Parameter

Bei den Angaben zu Missempfindungen zeigt sich unter 111ms Verzögerung ein niedrigeres Anspannungsempfinden als bei 41ms Verzögerung. Dies betrifft vor allem die Personen, die mit der Maus arbeiten. McCabe et al. (2005) konnten unter Umkehrung von visueller zu propriozeptiver Wahrnehmung (der Arm wird nach oben bewegt, aber nach unten bewegt gesehen) bei 66% der Pbn eine Veränderung der Empfindungen bis hin zu mildem Schmerz beobachten. Diese Umkehrung war konstant vorhanden und ist somit eine stärkere Operationalisierung von sensomotorischer Inkongruenz als eine visuelle Verzögerung, die sich nahe der Wahrnehmungsschwelle befindet. Letztere wirkt sich darüberhinaus nur in der Bewegungsphase „Bewegung zum Objekt“ aus. Sobald die Pbn mit dem Cursor über dem Objekt „schweben“, ist per se keine visuelle „Bewegungs“-Kontrolle mehr nötig. Eine weitere Ursache für die unter 111ms Verzögerung beobachtbare niedrigere Anspannung könnte somit durch das langsamere Arbeiten erklärt werden. Können Probandinnen langsamer arbeiten, fühlen sie sich weniger angespannt. Da der Unterschied nur bei der Maus signifikant wurde, ist anzunehmen, dass die Stiftnutzung und die Neuheit des damit verbundenen Bewegungsablaufs weniger entspannend wirkt (siehe Mordini, 2007). Die Anwendung eines alten motorischen Programms (Mausnutzung) lässt über die Anspannung bei neuronalen Konflikten (Fink et al., 1999) hinwegsehen, aber kommt noch die Umgewöhnung an ein neues Programm (Stiftnutzung) hinzu, wird die resultierende Anspannung negativer bewertet, obwohl die Probandinnen generell (egal ob mit Maus oder mit Stift) geneigt sind langsamer zu arbeiten.

Die subjektive Einschätzung der Beanspruchung zeigt höhere Werte während der 111ms Verzögerung. Der Effekt der, wenn auch nahe der Wahrnehmungsschwelle gelegenen, Verzögerung auf die Beanspruchung ist bei der Stiftarbeit größer als bei der Mausearbeit. Auch wenn sich die Differenzen der Beanspruchungswerte durch die Verzögerungsbedingungen von Eingabegerät zu Eingabegerät nicht unterscheiden, so scheint hier ein weiterer Hinweis auf die zusätzliche Belastung durch Neuheit des Stifts gegeben zu sein.

6.4.2 Reaktionszeiten und Tastendruckdauer

Die Probanden arbeiten bei 111ms Sekunden Verzögerung langsamer als bei 41ms Verzögerung. Dies bestätigt die Ergebnisse von Jay und Hubbard (2005). Die Differenz von 41ms und 111ms Verzögerung ist bei der Maus größer, jedoch nicht signifikant größer gegenüber der Stiftendifferenz. Der Vorteil der zusätzlichen propriozeptiven Information, die der Stift bereitstellt, wirkt sich nicht auf die Performance während der Störungen durch Verzögerung aus, auch wenn die Verzögerung einen größeren Effekt auf die Reaktionszeit bei der Mausearbeit hat. Bemerkenswert ist der marginal signifikante, bei der Maus gewichtigere Einfluss der 111ms Verzögerung auf die Tastendruckdauer, da diese nicht mehr optisch kontrolliert werden muss. Dies könnte bedeuten, dass ähnlich den Ergebnissen von Kalmus, Frey und Denes (1960) ein gedrückter „Overshoot“ unter visueller Verzögerung eintritt. Ein Overshoot bedeutet eine Zunahme von für das Nachzeichnen erforderlicher Bewegung durch das Überschreiten der nachzuzeichnenden Linien. Eine Ursache dafür, dass unter der Maus schneller gearbeitet wird, kann dabei in der Zeit zwischen dem Stift-Training und dem Hauptversuch liegen, oder aber in der zu kurzen Zeit der Stift-Trainingsphase (15 min) vor dem Experiment. Letztendlich gewinnt das überlernte motorische Programm vor dem wahrscheinlich noch zu lernenden.

6.4.4 Ruhe EMG

Das Ruhe- EMG in einem Zeitfenster von 10 Sekunden direkt nach der Aufgabenbearbeitung zeigt motorische Artefakte. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Probandinnen länger als 10 Sekunden brauchten, um die instruierte Ruhelage sicher einhalten zu können. Daher wurde für diese Messwerte keine inferenzstatistische Auswertung durchgeführt. Einzig die Ruheabnahme (Base) am Anfang scheint im Verhältnis vergleichbare Daten zu liefern. Dabei hatten die Probanden bei Ullman et al. (2003) eine muskuläre Aktivität des Extensors bei der Standard PC-Maus von $35\mu\text{V}$ zu stiftähnlichem Eingabegerät von $20\mu\text{V}$. Dies stimmt im Verhältnis mit den in dieser Studie zu beobachtenden Daten des Extensors überein (Standard PC-Maus $17.90\mu\text{V}$ zu Stift $14.94\mu\text{V}$). Generell hat sich jedoch das ereigniskorrelierte Verfahren trotz erhöhtem Aufwand als das stabilere erwiesen (s. u.).

6.4.4 Ereigniskorreliertes EMG

Das ereigniskorrelierte EMG zeigt bei der PC-Maus unter Erhöhung der visuellen Verzögerung ein Ansteigen der Beugeraktivität sowohl auf der ipsilateralen als auch auf der kontralateralen Seite. Beim Stift ist dies nur beim kontralateralen Strecker zu sehen, bei den übrigen Muskeln ist eine Verringerung der Aktivität zu beobachten. Da dieses zentrale Phänomen am Ende der Arbeit genauer diskutiert wird, soll das Augenmerk zunächst auf der ipsilateralen Seite und der unverzögerten Bedingung liegen. Dabei ist die ipsilaterale Beugeraktivität bei der Maus sehr viel ausgeprägter als beim Stift. Das Muster zeigt eine Überlappung mit der Streckeraktivität (deutliche Ko-Kontraktion). Diese erinnert an eine Aufladung, um die ballistische Energie zu erzeugen, die der Finger benötigt, um auf der Taste zu landen. Die antagonistische Aktivität könnte dabei als Widerstand dienen. Bevor die Taste ihren Endpunkt (Druckpunkt) erreicht hat, ist die Beugeraktivität wieder abgesunken. Der Beuger hat somit seine maximale Aktivität vor dem Tastendruck. Dies gleicht den Ergebnissen von Castellote et al. (2004) in der isometrischen Kontraktionsbedingung. Diese zeigen die gleichzeitige Aktivierung von Agonist und Antagonist. Dabei erinnert die Zusammenarbeit von Beuger und Strecker an ein sich aufziehendes Katapult.

Der Strecker ist bei beiden Eingabegeräten vor dem Tastendruck aktiv und zeigt Ähnlichkeit mit der „Flex to Target“-Bedingung von Waters und Strick (1981), die eine schnelle aber auch genaue Bewegung erfordert. Die Höhe der Strecker-Aktivität ist in der Ruheposition liegend bei der Maus höher ($17.90\mu\text{V}$) als beim Stift ($14.94\mu\text{V}$). Dies steht zunächst im Einklang mit den Ergebnissen von Ullman et al. (2003) und Kotani & Horii (2003), die eine höhere Aktivität aufgrund der Pronation des Unterarms belegen konnten. Die „Klick“-Bewegung (die am Ende der Zielbewegung steht) zeigt jedoch in der Strecker-Muskulatur eine höhere Aktivität während der Stift-Arbeit ($36.25\mu\text{V}$) im Gegensatz zur Mausearbeit ($30.99\mu\text{V}$). Dies kann an der Neuartigkeit der Bewegung liegen, da eine erhöhte Aktivität des Antagonisten ein Zeichen für ein noch nicht vollständig gelerntes motorisches Programm sein kann und somit die antagonistische Unterstützung noch stärker erforderlich ist (Osu et al., 1999). Dies wurde schon durch die Reaktionszeiten beschrieben, da die lange Phase zwischen Training und Versuch nicht die Konsolidierung eines „überlernten“ motorischen Programmes wie das der Maus ermöglichte. Neurophysiologisch würde dies neben erhöhter Aktivität des Neocerebellums auch eine erhöhte Aktivität des dorsolateralen präfrontalen Kortex und des Striatums (Jueptner & Weiller, 1998) bedeuten. Die benötigte

Zeit zur Verbesserung der motorischen Fähigkeit mit dem Stift variiert, das zeigen die Ergebnisse des Trainings und von Kotani & Horii (2003), von 2 Std. Training bis hin zu fünf Tagen und mit der Entscheidung, ob die Stiftspitze den „Klick“ vollzieht (Lange, 2003) oder ein Tastendruck (wie in dieser Studie). Es könnten aber auch haltungsbedingende Faktoren sein, da der Stift beim Klick von hinten „gehalten“ werden muss. Dies kann, je nach Stifthaltung, u. a. vom Mittelfinger geschehen. Diese Gegenkraft ist bei der Maus die Unterlage, auf der sie liegt. Auch wenn die Pronation ein wichtiger Faktor ist, der über die Zeit wirkt (Flodgren et al., 2007), könnte eine dauerhafte Erhöhung der Streckeraktivität trotz neutral(er) Stellung des Stifts ebenfalls zur schnelleren Ermüdung führen. Dies könnte bei längerer einseitiger Nutzung ohne Lernerfolg (nur Point and Click, kein Drag and Drop oder Tracking) eintreten.

Die Beugeraktivität ist bei einem Klick während der Mausearbeit höher ($15.67\mu\text{V}$) als während der Stiftarbeit ($8.70\mu\text{V}$). Dies ist ein neuer Befund, da bisher nur haltungsbedingte Entlastung der Strecker-Muskulatur durch weniger Pronation bei der Stiftarbeit beobachtbar wurde (Kotani & Horii, 2003; Ullman et al., 2003). Als Agonist muss der Beuger den Tastwiderstand durchbrechen. Hierbei müssen beim Stift andere Muskelgruppen mitwirken als bei der Maus, die durch einen deutlichen Anstieg der Beugermuskulatur vor dem Tastendruck gekennzeichnet ist. Zusätzlich zum „Wechsel“ der Platzierung von Eingabegeräten (Cook & Kothiyal, 1998; Delisle et al., 2004; Karlqvist, 1998; Karlqvist et al., 1998) sei daher für eine deutliche Entlastung der Beugermuskulatur ein Wechsel des Eingabegerätes (Stift) empfohlen.

6.4.4 Visuelle Verzögerung und EMG

Die Verzögerungsbedingung von 111ms hat zur Folge, dass sich bei der Mausearbeit die muskuläre Aktivität im Agonisten um $0.61\mu\text{V}$ und im Antagonisten um $0.79\mu\text{V}$ erhöht. Diese Veränderungen im EMG wirken zunächst sehr klein. Wird jedoch bei der Verzögerungsstufe von 111ms die Nähe zur Wahrnehmungsschwelle berücksichtigt, erscheint ein Wechsel der muskulären Aktivität umso bedeutsamer. Die Wahrnehmungsschwelle wird bei der Mensch-Computer-Interaktion bei $78 \pm 14\text{ms}$ ohne Angabe der System- Verzögerung (Zuberbühler et al., 2003) angenommen. Würde man zur letzteren eine schnelle System- Verzögerung von 20ms Bildschirmverzögerung aufaddieren, betrüge die Wahrnehmungsschwelle 98ms. Jay und Hubbard (2005) konnten bei 94ms somit bereits

„unterschwellig“ Bewegungsausführungen verändern. In dieser Studie wurde die muskuläre Aktivität einer Bewegungsausführung verändert, die per se keine optische Kontrolle mehr benötigte und das, obwohl die sich visuelle Verzögerung nahe der Wahrnehmungsschwelle befand.

Neben der Wahrnehmungsschwelle ist die Relation zur Ruhe- Aktivität von Bedeutung ($17.90\mu\text{V}$ Strecker, $5.44\mu\text{V}$ Beuger). Um der Darstellung von Ullman et al. (2003) zu folgen und auf Prozent zu erweitern: Beim Strecker ergibt sich bei der Mausnutzung unter 41ms Verzögerung eine 173-prozentige, bei 111ms Verzögerung eine 177-prozentige Steigerung der Muskelaktivität zur Ruheaktivität. Beim Beuger ergibt sich unter 41ms Verzögerung eine 288-prozentige, unter 111ms Verzögerung 299-prozentige Steigerung der Muskelaktivität. Es gilt langsames Arbeiten bei mehr Anstrengung. Der Leser mag entscheiden, ob 10% Steigerungsunterschied oder $0.61\mu\text{V}$ Differenz gewichtiger klingen, entscheidend ist jedoch, dass der muskuloskeletale Apparat kompensatorische Antworten auf minimale sensorische Inkongruenz zwischen propriozeptivem und visuellem Kanal gibt. Dies scheint in Abhängigkeit des afferenten Feedbacks zu geschehen, da der Stift unter der 111ms Verzögerung eine Abnahme der ipsilateralen muskulären Aktivität aufweist (Strecker $2.79\mu\text{V}$, Beuger $0.69\mu\text{V}$ Differenz). Da die Möglichkeit besteht bei der Arbeit mit dem Stift eine kognitive Karte auszubilden, kann mehr propriozeptiver Input genutzt werden. Es gilt langsames Arbeiten bei weniger Anstrengung. Ob der zunächst efferente, zusätzlich erforderliche Output, wie bei der Maus erforderlich, beim Stift aufgrund zusätzlicher propriozeptiver Signale „kompensatorisch“ auf die kontralaterale Seite projiziert wird, ist nicht zu beantworten, da die zum Tablett zugehörige Maus, welche ebenfalls über ein 1:1 Verhältnis zum Monitor verfügt, nicht getestet wurde. Dies sollte bei noch ausstehenden Studien berücksichtigt werden.

6.4.5 Visuelle Verzögerung und muskuläre Ko-Kontraktionen

Zur Untersuchung der muskulären Ko-Kontraktionen von Beuger und Strecker bzw. Agonist und Antagonist wurde zum einen die aus der Literatur stammende Formel von Frost et al. (1997) und Unnithan et al. (1996) sowie eine neu entwickelte, das Modell von Lund et al. (1991) beschreibende Formel zur Berechnung der Ko-Kontraktionen (KKI_PAM) verwendet. Die Formel von Frost et al. errechnet die gemeinsame Fläche zweier Muskeln. Die Formel zur Beschreibung des PAM errechnet das linear transformierte ($\cdot 1/7000$) Produkt aus

der Relation von gemeinsamer Fläche zu der Differenz beider Flächen mit der gemeinsamen Fläche. Diese Formel berücksichtigt somit sowohl das Niveau beider Muskeln als auch das Ansteigen von Ko-Kontraktionen durch das sich aufeinander Zubewegen der Flächenwerte (Agonist unter Schmerz niedriger, Antagonist unter Schmerz höher).

Muskuläre Ko-Kontraktionen waren bei der Mausearbeit unter Verwendung beider Formeln höher als bei der Stift-Arbeit. Dies bestätigt die oben beschriebene höhere Beuger-Aktivität während der Mausearbeit. Eine signifikante Zunahme durch die Verzögerung konnte nur mit dem KKI_PAM festgestellt werden. Dabei war die Differenz der Ko-Kontraktionen innerhalb der Mausearbeit signifikant höher als die der Stiftarbeit. Dies ist durch zwei Besonderheiten zu erklären: Bei der Maus steigt der Agonist unter Verzögerung nur minimal geringer an als der Antagonist. Der Agonist hat dabei etwa die Hälfte der Aktivität des Antagonisten. Bei dem Stift entspannt sich der Antagonist stärker als der Agonist. Dabei hat der Antagonist etwa das Vierfache der Aktivität des Agonisten. Die Extensor- und Flexor-Muskeln liegen ihrer Aktivität nach bei der Mausearbeit viel näher beieinander, obwohl sich die Niveaus vom Antagonisten unter Maus und Stift kaum unterscheiden. Bei der Maus entscheidet über das Anwachsen der Ko-Kontraktionen das Anwachsen des Niveaus beider Muskeln bei schon hoher Ko-Kontraktionsnähe. Beim Stift entspannt sich der Antagonist bei bereits bestehender sehr geringer Ko-Kontraktionsnähe.

Die Höhe der Ko-Kontraktionen ist abhängig von der aus der Theorie und Fragestellung entworfenen Formel. Hinsichtlich der quantitativen Zunahme hat sich das PAM innerhalb des Arbeitsmodells unter nicht schmerzhaften Reizen bestätigt. Wirft man aber ein Blick auf die einzelnen Muskelaktivitäten, sind unter Inkongruenz zweier sensorischer Kanäle andere Phänomene beobachtbar. Unter Mausearbeit steigen Agonist und Antagonist an. Unter Stiftarbeit nehmen beide ab. Dies widerspricht den Beobachtungen von Lund, ähnelt jedoch denen von Birch et al. (2000). Letztere sind, neben der phänomenologischen Beschreibung muskulärer Aktivität unter Schmerzen, auch eher „grober“ Natur. Die von Lund beobachteten Bewegungen sind einfacher, nicht ballistischer Art und weniger unterschiedlichem sensorischem Feedback unterworfen. Es bleibt festzuhalten, dass muskuläre Ko-Kontraktionen, die unter sensomotorischer Inkongruenz durch visuelle Verzögerung erzeugt werden, sich von denen, die bei chronischen oder experimentellen Schmerzen zu beobachten sind, unterscheiden.

Der Stift scheint, wie bereits oben erwähnt, durch eine als schlechter bewertete Neuartigkeit und dabei unwissentlich ablaufende muskuläre Entspannung (siehe Gustafsson & Hagberg, 2003) eine vereinfachte Bewegungskontrolle durch propriozeptive Signale (siehe Nijhof, 2003) sowie eine Reduzierung von muskulären Ko-Kontraktionen zu ermöglichen. Das propriozeptive Feedback ist in dieser Studie von zentraler Bedeutung und zeigt sich in der muskulären Aktivität beider Arme. Eine ausführliche Diskussion zum lateralen Transfer der sensorischen Effekte wird in der Modelldiskussion am Ende der Arbeit geführt.

7. Studie 2: Thermische Reizung bei der Tastaturarbeit

7.1 Die Bedeutung afferenter Information beim Tastschreiben

Nur wenige Studien verweisen auf die Bedeutung von sensorischem und reafferentem Feedback bei Tippbewegungen. Guggenbühl und Krueger (1990) untersuchten die muskulären Konsequenzen des Tippens auf Keyboards mit unterschiedlichen Tastwiderständen. Die Veränderung des reafferenten Feedbacks führte zu einer Veränderung des Tipprhythmus und zu einer Erhöhung der muskulären Belastung. Dabei erzeugte ein Membran-Keyboard mit Widerstandspunkt von 2.5 Newton eine längere Tastendruckbewegung (700ms) bei einer resultierenden Tippgeschwindigkeit von 1.5 Hertz und höherem EMG im Flexor und Extensor (höheren Ko-Kontraktionen) als ein normales (Key-Travel-) Keyboard, bei dem eine Tastendruckbewegung von 300-400 ms, 3-4 Hertz Tippgeschwindigkeit und reduziertes EMG beider Muskeln zu beobachten war. Geschwindigkeit und muskuläre Anspannung waren negativ korreliert (-.78 bis -.80).

Verzichtet man beim Tippen auf die Veränderung des reafferenten Feedbacks, erhält man einen positiven Zusammenhang von Geschwindigkeit und EMG-Aktivität (Gerard, Armstrong, Martin & Rempel, 2002). Dabei konnten die Forscher einen langsam ansteigenden linearen Trend von Tippgeschwindigkeit und EMG-Aktivität feststellen.

Elektromyographische Studien zur ballistischen Extension und Flexion (Waters & Strick, 1981; Meinck, Benecke, Meyer, Hönig & Conrad, 1984; Castellote, Valls-Solé & Sanegre, 2004; Dennerlein, Mote & Rempel, 1998) zeigen dabei unterschiedliche elektromyographische Muster (Vorkommen von Extensor- und Flexor- Bursts). Waters und Strick (1981) fanden eine Abhängigkeit der Bursts der antagonistischen Muskelaktivität von der Bewegungsbedingung (Kontrollstrategie). Sollte eine ballistische Flexion möglichst schnell und so genau wie möglich ausgeführt werden, führte dies zu einem großen und weiten Flexor-Burst. Bestand die Aufgabe der ballistischen Flexion darin eine Bewegung auszuführen, die durch einen Widerstand zum Erliegen gebracht wurde, kam es zu einem sehr viel geringeren Burst des Antagonisten. Meinck, Benecke, Meyer, Hönig und Conrad (1984) untersuchten Flexor- und Extensor-Bursts bei ballistischem Fingertippen. Durch Variation von isometrischen und isotonischen Bewegungsbedingungen fanden sie eine Abhängigkeit des antagonistischen Burstauftretens von Anfangsladung, Bewegungsweite und Instruktion.

Beide Studien zeigen, dass auch die „Erwartung“ (siehe Efferenzkopie) einer bestimmten Rückmeldung in einem motorischen Programm die antagonistische Aktivität beeinflussen kann, obwohl die Bewegung an sich ballistisch und somit frei von direktem sensorischem Feedback ist. Bei der elektromyographischen Abnahme ballistischer Tastschreibbewegungen ist zu beachten, dass aufgrund von Überschneidungen der Anschläge beim 10-Fingertippen (Gentner et al., 1988) die ereigniskorrelierte EMG Aktivität sich auf einen einzelnen Tastendruck beziehen sollte, da mehrere Anschläge mit der gleichen Hand im EMG nicht mehr identifizierbar wären.

7.1.1 Thermische Reizung und Muskelaktivität

Studien zur Veränderung des ex-afferenten Feedbacks bei Tipp-Bewegungen durch thermische Reizung unter Anwendung ereigniskorrelierten EMGs sind bisher nicht auffindbar. Untersuchungen zum Einfluss von Hitze- oder Kältereizungen auf Motorik (Hunter, Claire- Gibson, Mbambo, Lambert & Noakes, 2002; Tucker, Rauch, Harley & Noaks, 2004), insbesondere bei Kälte, zeigen sowohl Veränderungen der kontraktile Fähigkeiten des Muskels bei Tieren (Mense, 1978) als auch Veränderungen im EMG beim Menschen (Oksa, Rintamäki & Rissanen, 1997; Rissanen, Oksa, Rintamäki & Tokura, 1996) und in den Reflex-Latenz- Zeiten (Schieppatti & Nardone, 1997). Schmerzhafte Kältereize scheinen eher eine aktivierende Wirkung zu haben (Schmidt, 1998), obwohl man annimmt, dass die Performanz unter Kälte generell reduziert ist (Gavhed, 2003).

Nomura, Kawano, Kang, Lee, Han, Kim et al. (2002) beobachteten Ratten, die sich 20 Wochen (eine Stunde pro Tag, fünf Tage pro Woche) lang in einem mit 18 Grad Celsius kühlem Wasser gefüllten Zylinder aufhielten. Während der Kälteapplizierung war das EMG des Soleus (S) - und Extensor Digitorum Longus- Muskels (EDL) erhöht. Veränderungen der kontraktile Eigenschaften äußerten sich in einer erhöhten Erholungsphase (Zeitkonstante des EDL), einer verlängerten Kontraktionszeit, einer Verringerung der Twitch-Spannungsentwicklung und einer erhöhten Müdigkeitsresistenz im EDL. Aufgrund dieser Befunde kommen die Autoren zum Schluss, dass hier eine Verlagerung der kontraktile Eigenschaften der Fast-Twitch Fasern in Richtung Slow-Twitch Fasern stattgefunden hat.

Eine Studie zum H- und Streck-Reflex der Wadenmuskulatur (Oksa, Rintamäki, Rissanen, Rytty, Tolonen & Komi, 2000) zeigte unter Einfluss von 10 Grad Celsius ein

erhöhtes EMG des M. Trizeps Surae während der Streckphase und niedrigeres EMG während der Verkürzungsphase. Gleichzeitig war die EMG-Aktivität des M. Tibialis Surae Anterior während der Verkürzungsphase unter Kälteeinfluss erhöht. Die Autoren erklären dies durch kälteevozierte reduzierte Aktivität der Muskelspindeln. Diese führt zu einem Behindern des Agonisten und zu einem ungehinderten Feuern des Antagonisten während der Verkürzungsphase (Ko-Kontraktion auf Reflexbasis).

Oksa, Ducharme und Rinkamäki (2002) konnten zeigen, dass repetitive Bewegung während 120-minütiger Kälteapplizierung (5 Grad Celsius) höhere EMG (MVC-)-Aktivität (25% mehr bei lokaler Applikation, 31% mehr bei globaler Applikation) im Flexor Carpi Radialis und Flexor Digitorum Superficialis hervorruft als repetitive Bewegung allein. Ebenso war in den Kältebedingungen der Müdigkeitsindex um 37% erhöht. Die Autoren beobachteten unter Kälte auch ein erhöhtes Vorkommen von Ko-Kontraktionen: „During the concentric contraction the emg-activity of the forearm flexors and extensors was significantly higher (i.e. increased coactivation) during C5 and LC5 in relation to thermoneutral activity (...). The EMG results very clearly indicates that, during concentric contraction the level of coactivation (i.e. increased EMG activity of flexor and extensor muscles) increased significantly during both cold conditions and remains elevated throughout the exposures” (Oksa et al., 2002 S. 357, 360). 5 Grad Celsius scheint dabei ein für die Beanspruchungsmessung zu niedriger Wert zu sein, da man hier noch von ischämischer Schmerzauslösung (bei 0-4 Grad Celsius) ausgehen kann (Wall & Melzack, 1999).

Zusammenfassend scheint Kälte in Abhängigkeit der Funktion des Muskels (Agonist/Antagonist) eine Erhöhung der EMG- Aktivität (Rissanen et al., 1996; Nomura et al., 2002) bei gleichzeitigem Auftreten von Ko-Kontraktion (Oksa et al., 2000, 2002) zu bewirken, während Hitze eher ein niedriges EMG zur Folge hat (Tucker et al., 2004). Eine erhöhte Schmerzschwelle bzw. -wahrnehmung bei Hitzereizung oder Kältereizung für die linke Hand aufgrund einer für negative Emotionen und taktile Sensitivität dominierenden rechten Gehirnhälfte konnte nicht nachgewiesen werden (Long, 1994; Greenspan, Taylor & McGillis, 1993). Für die funktionale Hemisphärenlateralisation bedeutsam (siehe dazu „rivalisierende Hemisphären“ von Kobayashi, Hutchinson, Théoret, Schlaug & Pascual-Leone, 2004) erscheint jedoch laterale Belastung, da bei rechtshändigen Probanden 95% der Sprachverarbeitung in der linken Gehirnhälfte lokalisiert ist (Rasmussen & Milner, 1977). Da die rezeptiven Felder für die Verarbeitung von Kälte auf der ipsilateralen Seite (Hensel, 1981)

liegen und die kortikale Verarbeitung kontralateral wie ipsilateral erfolgt (Davis, Kwan, Crawley & Mikulis, 1998), könnte eine Veränderung des ex-afferenten Feedback der rechten Extremität bei Rechtshändern andere Konsequenzen für den Organismus haben als eine Veränderung des ex-afferenten Feedbacks der linken Extremität.

Schaltet man das ex-afferente Feedback beim Zehnfingerschreiben aus, indem man beispielsweise einen Finger anästhesiert (Rabin & Gordon, 2004; Rao & Gordon, 2001), verändert sich die Zeit zwischen den Tastendrüken nicht, jedoch steigt die Fehleranzahl bei diesem Finger an. EMG- Aktivität wurde hierbei nicht erhoben, ebensowenig Aussagen zur Lateralisierung diskutiert. Die kinematische Auswertung zeigte eine regressionsanalytisch höhere Endpunktvariabilität aufgrund erhöhter Startpunktvariabilität (Rabin & Gordon, 2004). Eine Reduzierung der Freiheitsgrade durch Antizipation (Bernstein, 1967) scheint hierbei unmöglich. Weniger starke Belastung durch reafferente Veränderung wie z. B. Tausch des Keyboards bewirkte bei professionellen Schreibkräften kein erhöhtes Fehleraufkommen (van Galen, Liesker & de Haan, 2007). Im Gegensatz zu verändertem afferentem Feedback scheint Belastung durch Doppelaufgaben eine verminderte Tipprate, erhöhte Tastendruckdauer und erhöhtes Fehleraufkommen zu bewirken (Bowers, Heilman, Satz & Altman, 1978; Zilske, 2000).

Die Studie hat die Aufgabe zu klären, ob die Entstehung muskulärer Ko-Kontraktionen bei ballistischen Fingerbewegungen (Tastschreiben) abhängig von thermischen Bedingungen ist und ob letztere sich bei unilateraler Applizierung auch bilateral auf zentral-motorische Parameter wie z. B. die Tastendruckdauer auswirken. Dabei soll der Einfluss thermischer Reizung bei unterschiedlicher lateraler Beanspruchung und unterschiedlichem lateralem Reizort auf Befinden, Leistung sowie muskuläre Aktivität, Muster und Ko-Kontraktionen beim Zehnfingerschreiben überprüft werden. Dies ist unter Berücksichtigung des im Theorieteil beschriebenen Arbeitsmodells in den folgenden Hypothesen zusammengefasst:

Hypothese 1

Wenn die thermische Bedingung der rechten oder linken Hand beim Maschineschreiben durch vorherige Kälteapplikation verändert wird,

- (a) dann steigt die ereigniskorrelierte EMG-Aktivität des ipsilateralen Agonisten (Flexor) und Antagonisten (Extensor) während des ipsilateralen Tastenanschlags.
- (b) dann erhöhen sich die muskulären Ko-Kontraktionen des ipsilateralen Unterarms durch niedrigere Agonisten- und höhere Antagonisten- Aktivität während des ipsilateralen Tastenanschlags.
- (c) dann werden weniger Anschläge gemacht.
- (d) dann verlängert sich die Tastendruckdauer.
- (e) dann unterscheidet sich die Anzahl der Tippfehler nicht von der in der thermoneutralen Bedingung.
- (f) dann wird die Befindlichkeit als schlechter und die Beweglichkeit als geringer eingestuft.

Hypothese 2:

Wenn die thermische Bedingung der rechten oder linken Hand beim Maschineschreiben durch vorherige Hitzeapplikation verändert wird,

- (a) dann sinkt die ereigniskorrelierte EMG-Aktivität des ipsilateralen Agonisten (Flexor) und Antagonisten (Extensor) während des ipsilateralen Tastenanschlags.
- (b) dann verringern sich die muskulären Ko-Kontraktionen des ipsilateralen Unterarms durch erhöhte Agonisten- und niedrigere Antagonisten- Aktivität während des ipsilateralen Tastenanschlags.

Hypothese 3:

Wenn die thermische Bedingung der rechten Hand beim Maschineschreiben durch vorherige Kälteapplikation verändert wird und gleichzeitig die Schreibbelastung dieser Hand größer ist als die der ungereizten Hand,

- (a) dann ist das EMG der Agonisten und Antagonisten der gereizten Hand höher als in allen anderen Bedingungskombinationen.
- (b) dann sind die Ko-Kontraktionen der gereizten Hand höher als unter allen anderen Bedingungskombinationen.

7.2 Methode Studie 2

Mit Ausnahme der Geräte/Software, für die ein Herstellername oder Autor angegeben wird, sind alle in dieser Arbeit verwendeten Apparaturen in der Werkstatt des Psychologischen Instituts der TU-Darmstadt von Herrn Manfred Häfke angefertigt und die für Versuche und EMG-Abnahme benötigte Software vom Autor in VB.NET mit Visual Studio 2003 Enterprise Architect als IDE programmiert worden.

7.2.1 Laboraufbau

Der Hauptversuch war auf zwei Räume des arbeitsphysiologischen Labors im Psychologischen Institut der Technischen Universität Darmstadt verteilt. In Raum Nr. 1 saß der Versuchsleiter (VL) zur Kontrolle der EMG- und der Schreibparameter während des Versuches und in Raum Nr. 2 die Probandin. Die Abbildung 34 zeigt den Arbeitsplatz der Probandinnen in Raum Nr. 2, in dem während den Untersuchungen eine durchschnittliche Temperatur von 23°C (22 – 24°C) bei einer Luftfeuchtigkeit von ca. 60% und einem Geräuschpegel von ca. 40 dbA gemessen wurde.



Abbildung 34. Probandinnenarbeitsplatz

7.2.2 Laborausstattung

7.2.2.1 Computer

In Tabelle 18 sind die für die Studie verwendeten Rechner aufgeführt. Um das Eingreifen des Versuchsleiters in den Versuchsablauf zu reduzieren, wurde mit Hilfe des .NET Frameworks (Namespace System.Remoting) eine verteilte Anwendung (Pinnock, Curran & Olsen, 2002), bestehend aus einem Schreibeditor und einer EMG- Applikation entwickelt. Der Editor automatisierte während der Durchführung die Speicherung des EMG (s. u.), die Kontrolle der Zeit, die Restriktion des Keyboards (s. u.) und die Speicherung der Schreibdaten (s. u.). Abbildung 35 gibt vereinfacht den technischen Aufbau wieder.

Tabelle 18

Versuchsrechner

Aufgabe	PC	OS	Entwicklung	CPU	HD	RAM	Monitor	Sonst.Hardware
Schreibeditor, Zeitsteuerung, Tastaturrestriktion, Speicherung der Texte, Wiedergabe der MMPI-Fragen	OEM	Win 2000 Sp4	.NET 1.1 Framework Sp1	P4 1.6 ghz	40 Gb	512 Mb	Benq fp71g, V7 pd-70fa (Auflösung je 1024/768)	Cherry Tastatur mit Photozellen unter N- und B- Taste
Aufnahme und Speicherung des ereigniskorrelierten Oberflächen- EMG	OEM	Win 2000 Sp4	.NET 1.1 Framework Sp1 Measurement Studio, NI	P2, 466 mhz	20 Gb	512 Mb	Benq fp71g, V7 pd-70fa (Auflösung je 1024/768)	NI- PCI Karte NI- DAQ 6025

Raum Nr.2

Raum Nr.1

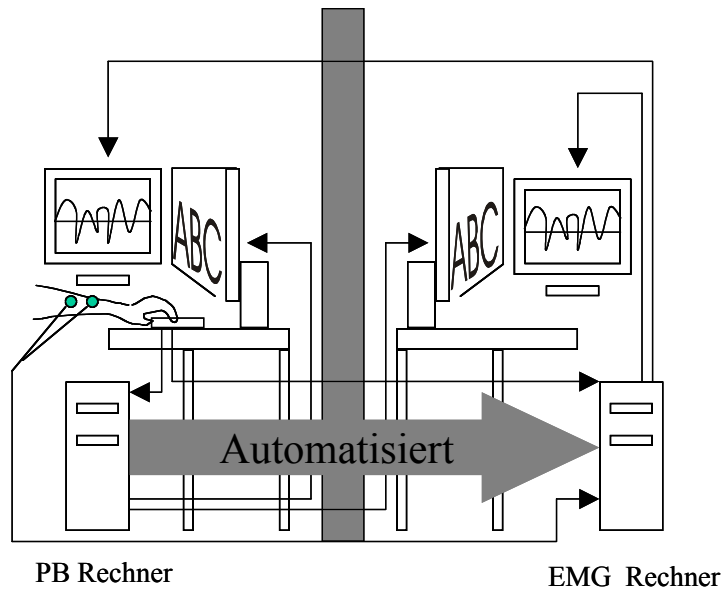


Abbildung 35. Schematischer Aufbau des Versuchslabors

7.2.2.2 Tastatur

Verwendet wurde eine Cherry Tastatur mit Qwertz- Tastenanordnung. Diese enthielt unterhalb der „N“- und „B“- Taste jeweils eine Photozelle. Im ungedrückten Zustand wurden konstant 5 Volt an einer Schnittstelle (pro Taste) ausgegeben. Durch das Drücken der „N“ oder „B“- Taste (Tasten- Onset) wurde der Stromfluss unterbrochen. Diese Funktion wurde als Triggierung für das EMG (s. u.) benutzt.

7.2.2.3 Ereigniskorreliertes EMG

Die Ableitpunkte des EMG lagen über den proximalen und distalen Streckermuskeln M. extensor digitorum communis sowie über den proximalen und distalen Beugermuskeln M. flexor digitorum superficialis des rechten und linken Unterarms. Abgenommen wurde mit Elektroden des Typs Blue Sensor NS-00-S der Firma Ambu. Die Vorverstärker von Biovision leiteten das Signal über Optokoppler und Trennverstärker mit einem Verstärkungsfaktor von 5000 in die National Instruments NI-DAQ 6025 Karte eines PC. Dort wurde ein mit Hilfe der Klassenbibliothek Measurement Studio (NI) entwickeltes, fernsteuerbares Programm zur EMG- Aufnahme verwendet (siehe Abbildung 36) und das getriggerte Signal bei 500 Hz und

170 Samples pro Kanal in eine Textdatei geschrieben. Die Karte erfasste die Daten nach FIFO Speichermodell (First In First Out) kontinuierlich. Dies ermöglichte die Erfassung des EMG via Trigger 140ms (70 Samples) vor dem Tasten- Onset (Pretrigger/PT) bis 200ms (100 Samples) nach dem Tasten- Onset. Es resultiert pro Tastendruck, in Anlehnung an die von Wandmacher (1993) dargestellte mittlere Tastendruckdauer, ein EMG- Tastendruckzeitfenster von insgesamt 340ms (170 Samples).



Abbildung 36. Fernsteuerbare Ereigniskorrelierte EMG- Applikation

7.2.2.4 Schreibeditor

Der Editor hatte neben der Erfassung und dem Speichern der Sätze (s. u.) die Aufgabe der zeitlichen und informellen Kontrolle, der Restriktion der Keyboardtasten und der Wiedergabe von MMPI- Items (Deutsche Fassung des Minnesota Multiphasic Personality Inventory nach Gehring & Blaser, 1982) in den Pausen. Die Schriftart Arial wurde auf eine Größe von 24 pt festgelegt. Die Zeit zum Warschreiben betrug 1 Minute, die Zeit zum Schreiben 5 Minuten und die Darstellung jedes MMPI- Items ca. 5 Sek. (insgesamt 4.16 min). Wurden diese Zeitpunkte erreicht, speicherte der Editor das Geschriebene und ein Informationsfenster erschien. Die Darbietungsdauer des Informationsfensters zwischen den Durchgängen lag bei 60 Sek. und wurde als Countdown angezeigt. Für die Zeitkontrolle in dieser Studie wurde in Anlehnung an Chambers und Brown (2003) eine spezielle Programmklasse, die sowohl die Threading-Komponente berücksichtigt als auch vom High Resolution Timer Gebrauch macht, erstellt und verwendet. In Tabelle 19 sind die Informationssätze dargestellt.

Tabelle 19

*Informationssätze während des Versuchablaufs. Das * steht für den angezeigten Wert des Countdowns oder des Abschnitts.*

Platzierung	Sätze
Nach dem Warmschreiben	Das Warmschreiben ist nun beendet. Der erste Schreibabschnitt beginnt bald. Bitte drücken Sie keine Tasten und warten Sie, bis der Versuchsleiter erscheint und ihnen weitere Instruktionen gibt. Noch * Sekunden, bis das Fenster sich schließt.
Nach dem Schreiben, vor den Fragen	Abschnitt * beendet. Bitte drücken Sie keine Tasten. Es folgen nun einige Fragen, die Sie bitte mit „ja“ oder „nein“ beantworten. Dazu sprechen Sie bitte laut und deutlich. Noch * Sekunden, bis das Fenster sich schließt.
Nach den Fragen, vor der Intervention	Abschnitt * beendet. Bitte drücken Sie keine Tasten und warten Sie auf den Versuchsleiter, der Ihnen weitere Instruktionen geben wird. Noch * Sekunden, bis das Fenster sich schließt.
Nach dem letzten Schreiben	Versuch beendet. Bitte warten Sie auf den Versuchsleiter. Vielen Dank für die Teilnahme an diesem Experiment!

Die Keyboardtasten wurden auf ihren ASCII-Wert hin überprüft und nach Brauchbarkeit restringiert. Es waren nur die Werte 13 (Return), 32 (Space) und 97 -122 (Buchstaben a-z) zugelassen. In den Pausenabschnitten wurden je 50 Items des MMPI dargestellt, mündlich mit „ja“ oder „nein“ beantwortet und die Antworten nicht aufgezeichnet.

7.2.3 Aufgabe

Die linksseitige Beanspruchung wurde durch einen Pro-Qwertz-Satz (annäherungsweise 60% mit linker Hand und 40 % mit rechter Hand getippte Tasten), die rechtsseitige durch einen Kontra-Qwertz-Satz (annäherungsweise 40% mit rechter Hand und 60% mit linker Hand getippte Tasten) operationalisiert. Die Häufigkeiten der in der deutschen Sprache gebrauchten Tasten gemäß der Buchstaben (Best, 2005) finden sich in Tabelle 20 wieder.

Weiter galten folgende Kriterien:

1. Die Trigger- Tastenfolgen wechseln sich ab.
2. Der zeitliche Abstand der Triggertasten bleibt gleich.

3. Der zeitliche Abstand wird so gewählt, dass es keine Überlappung zwischen rechts und links geben kann.
4. Vor und nach einer Triggertaste kommt eine Taste der kontralateralen Hand oder eine „space“- Taste, um die Varianz der Anschlagsdauer zu reduzieren (vgl. Viviani & Laissard, 1996).
5. Die Sätze sollen nicht völlig aus sinnlosen Wörtern bestehen.

Tabelle 20

Häufigkeiten von Buchstaben in der deutschen Sprache und ihre Hand-Zuordnung auf einer Qwertz- Tastatur.

Platz	Relative Häufigkeit	Buchstabe	Hand	Platz	Relative Häufigkeit	Buchstabe	Hand
1	17.40 %	<u>E</u>	L	15	2.51 %	<u>O</u>	R
2	9.78 %	<u>N</u>	R	16	1.89 %	<u>B</u>	L
3	7.55 %	<u>I</u>	R	17	1.89 %	<u>W</u>	L
4	7.27 %	<u>S</u>	L	18	1.66 %	<u>F</u>	L
5	7.00 %	<u>R</u>	L	19	1.21 %	<u>K</u>	R
6	6.51 %	<u>A</u>	L	20	1.13 %	<u>Z</u>	R
7	6.15 %	<u>T</u>	L	21	0.79 %	<u>P</u>	R
8	5.08 %	<u>D</u>	L	22	0.67 %	<u>V</u>	L
9	4.76 %	<u>H</u>	R	23	0.31 %	<u>ß</u>	R
10	4.35 %	<u>U</u>	R	24	0.27 %	<u>J</u>	R
11	3.44 %	<u>L</u>	R	25	0.04 %	<u>Y</u>	L
12	3.06 %	<u>C</u>	L	26	0.03 %	<u>X</u>	L
13	3.01 %	<u>G</u>	L	Ergebnis relativer Häufigkeit	Rechte Hand	38.63%	
14	2.53 %	<u>M</u>	R		Linke Hand	54.66%	

Die erstellten Sätze waren:

Pro-Qwertz

neuer boxer nahm obies antrag bis fanfare blies

(40 Buchstaben, 7 Leer, 13 Rechts 27 Links, 32.5% Rechts 67.5% Links)

Contra-Qwertz

nejil bozul nahm obulujantuch bis manti ombikte

(41 Buchstaben, 6 Leer, 27 Rechts 14 Links, 65.9% Rechts 34.1% Links)

Die beiden Sätze wurden später mittels folgender Kriterien nach Richtigkeit überprüft (Christ, 2002):

- die Vollständigkeit aller Zeichen inklusive Leerzeichen

- das richtige Setzen jedes Zeichens am richtigen Ort
- die Richtigkeit der geschriebenen Wörter
- das richtige Setzen des Satzanfangs bzw. das Drücken der Return-Taste

Mit Hilfe dieser Kriterien wurde anschließend folgendes Werteschema erstellt:

- Jedes falsche Zeichen gilt als ein Fehler mit der Ausnahme, dass bei sichtbarem einfachem Vertauschen von zwei hintereinanderliegenden Buchstaben nur ein Fehler gegeben wird.
- Wiederholungsfehler werden als Fehler gezählt.
- Eine leere Zeile wird als das wiederholte (falsche) Drücken der Return-Taste angesehen und somit als einfacher Fehler gewertet. Das gleiche gilt für zwei, drei, vier etc. leere Zeilen.

Im nächsten Schritt wurde der Fehlerquotient jeweils als prozentualer Anteil der gefundenen Fehler an der Anzahl der gemachten Zeichen gebildet.

7.2.4 Fragebögen

Der allgemeine Fragebogen (siehe Anhang B) enthielt 19 Items zu demografischen Daten, gewesenen/akuten Krankheiten, Arbeits- und Freizeitgewohnheiten, Schmerzen/Belastungen sowie aus dem Englischen übersetzte Fragen des Edinburgh Handedness Inventory zur Händigkeit (Oldfield, 1971). Die subjektive Befindlichkeit der Versuchspersonen wurde mittels visueller Analogskala (siehe Anhang C) erfragt. Aussagen zur eigenen Befindlichkeit (Einfachheit des Schreibens, Beweglichkeit, Spüren von Schmerzen jeweils im rechten/linken Unterarm und Nacken/Schulterbereich) sollten je nach Ausmaß durch ein Kreuz auf einer 10cm langen Linie eingestuft werden, die Pole waren mit „nicht wahrnehmbar“ und „deutlich wahrnehmbar“ bezeichnet.

7.2.5 Stressoren

Die Operationalisierung des veränderten sensorischen Inputs wurde mit 42 Grad heißem, 8 Grad kaltem und 32 Grad thermoneutralem (siehe De Marées, 2003) Wasser realisiert. Die Wassertemperaturen wurden mittels eines Thermostaten (Haake F6), eines Kryostaten (Haake F4) bzw. eines Aquarienheizers (Jäger 3605) erzeugt. Je nach Bedingung wurde vor dem Schreiben die rechte oder die linke Hand bis zum Handgelenk fünf Minuten

lang in das jeweilige Gefäß gehalten. Zur Kontrolle der Temperatur wurde nach jeder Schreibphase mit Hilfe eines Digitalthermometers (Greisinger Electronic GTH 1200 A) die Handtemperatur erhoben. In Abbildung 37a-c ist die Anordnung wiedergegeben.

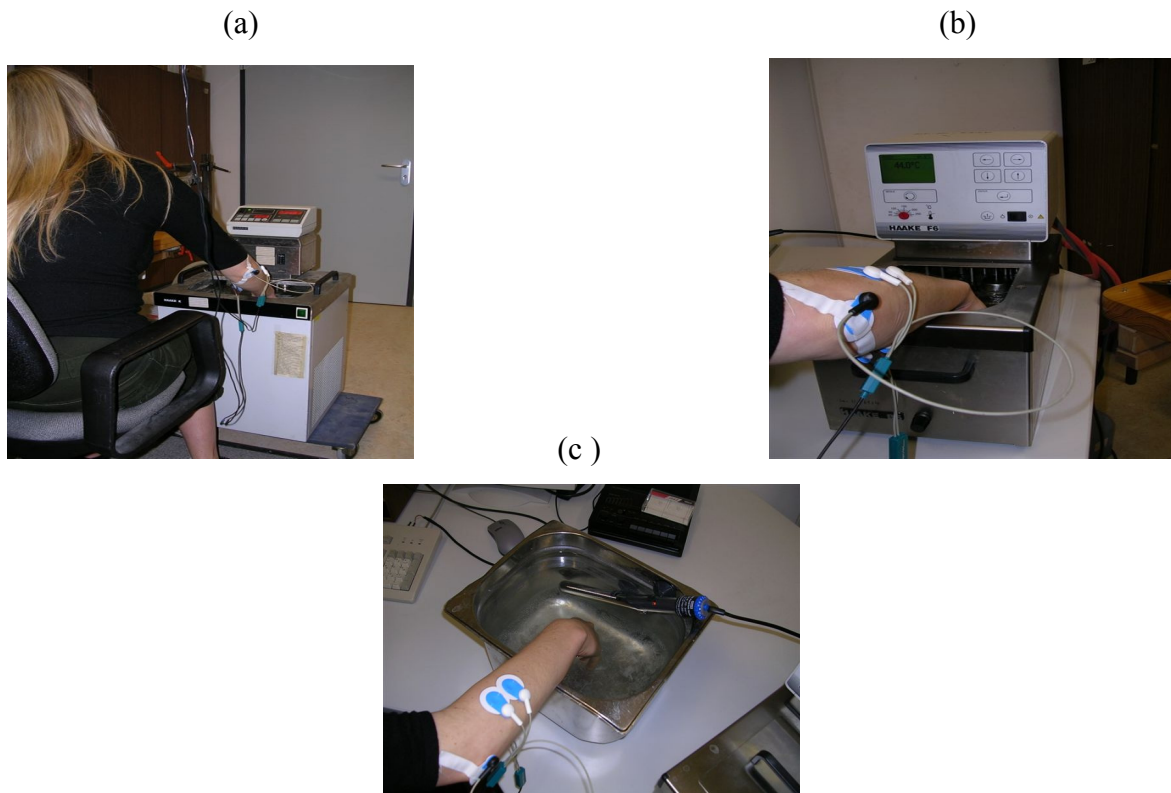


Abbildung 37a-c: Operationalisierung der veränderten Haptik durch (a) hypotherme (K), (b) hypertherme (H) und (c) isotherme (N) Bedingung.

7.2.7 Versuchsplan und Versuchsablauf

Der Versuch wurde innerhalb eines 2 x 2 x 3- Versuchsplans realisiert. Die Zuordnung der Probandinnen wurde per Los bestimmt. Die Zwischensubjektfaktoren des Versuchsplans stellten die Satzart (Pro-QWERTZ/ Contra-QWERTZ) und der Reizort (linke oder rechte Hand), die Innersubjektvariable die Reizart (Hitze, Kälte, Neutral) dar. Abbildung 38 gibt einen Überblick. Eine Konfundierung von Zeit und Bedingungskombination wurde auf Grund der vollständig permutierten thermischen Bedingungen ausgeschlossen.

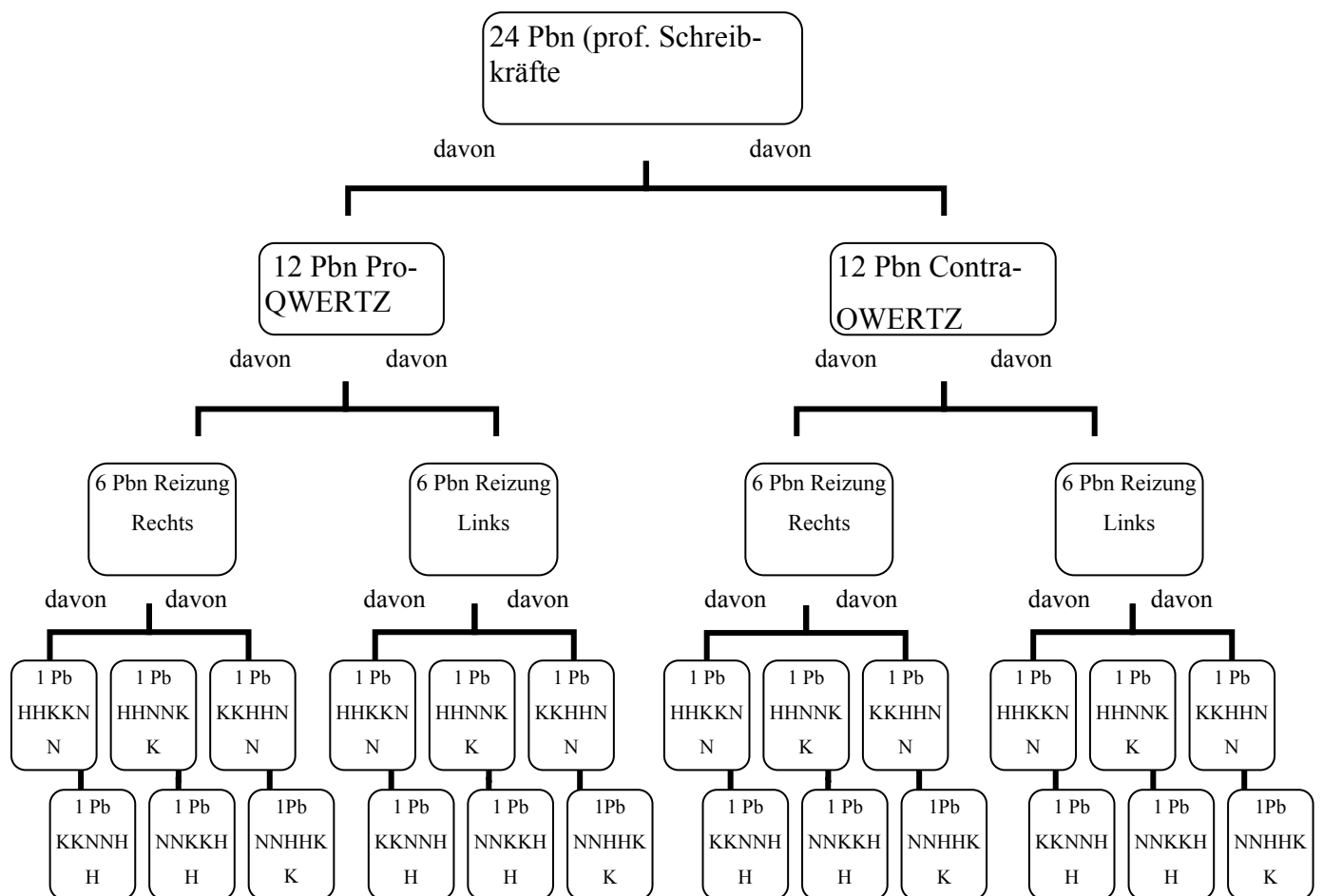


Abbildung 38. Versuchsplan der Studie Thermische Reizung bei der Tastatarbeit. Contra-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 65.9% aus rechts und 34.1% aus links getippten Tasten besteht; Pro-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 32.5% aus rechts und 67.5% links getippten Tasten besteht; Rechts = Reizung rechte Hand; Links = Reizung linke Hand; K = 8 Grad Celsius Reizung, N = 32 Grad Celsius Reizung, H = 42 Grad Celsius Reizung.

Der Versuch dauerte etwa 120 Minuten. Nach der Begrüßung wurde die Pb via Los einer Bedingungskombination zugewiesen, instruiert und gebeten im Anschluss den allgemeinen Fragebogen sowie das Edinburgh Handedness Inventory auszufüllen. Danach erfolgten die Palpation der Muskulatur und das Anlegen der Elektroden. Anschließend wurden Sitzplatz, Platzierung der Geräte und der Sitz der Elektroden geprüft und gegebenenfalls korrigiert. Sobald alle Elektroden artefaktfreie Signale lieferten, wurden eine EMG- Baseline (Muskel in Ruhestellung) sowie die maximale willentliche Anspannung (MVC) an allen vier Muskeln erhoben. Sobald letzte Fragen zu Instruktion und Versuchsablauf beantwortet waren, begann die Pb mit dem Warmschreiben. Nachdem am Bildschirm eine Nachricht zur Beendigung des Warmschreibens erschien, wurde der Probandin der VAS- Bogen vorgelegt und die Temperatur der Finger gemessen. Anschließend wurde sie gebeten je nach Bedingung fünf Minuten ihre Hand in eines der Gefäße zu halten, Direkt nachdem die Probandin ihre Hand aus dem Wasser hob und kurz auf ein Handtuch legte, begann die Schreibphase (5 Minuten). Nachdem auf dem Bildschirm eine kurze Nachricht zur Beendigung der Schreibphase angezeigt wurde, bekam die VP wieder einen VAS- Bogen vorgelegt und die Temperatur der Finger wurde gemessen. Am Ende einer Experimentalphase erschienen hintereinander insgesamt 50 Items (5 Sek. pro Item) des MMPI, die die Pb mündlich beantworten sollte. Insgesamt gab es sechs Experimentalphasen. Nach Untersuchungsende bestand noch Gelegenheit Fragen an den Versuchsleiter zu stellen, anschließend wurde die Pb verabschiedet. Zur Veranschaulichung der Versuchsabfolge am Beispiel der Kombination W(armschreiben) H1H2K1K2N1N2 siehe Abbildung 39.

Tätigkeit N =	24			
15 min.	Begrüßung/ Allgemeiner Fragebogen Edinburgh Handedness Inventory/Pb- Präparation Ruhe-EMG-und MVC-Messung (vor Versuchsbeginn)			
Tätigkeit N =	12		12	
1 min./30sek.	Warm Schreiben mit Pro-Qwertz-Satz/ Messen der Fingertemperatur und VAS		Warm Schreiben mit Contra-Qwertz-Satz/ Messen der Fingertemperatur und VAS	
Tätigkeit N =	6	6	6	6
5 min.	Reizung H1 linke Hand	Reizung H1 rechte Hand	Reizung H1 linke Hand	Reizung H1 rechte Hand
Tätigkeit N =	12		12	
5 min.	Schreiben Pro-Qwertz Satz		Schreiben Contra-Qwertz Satz	
Tätigkeit N =	24			
30 sek.	Messen der Fingertemperatur und VAS			
Tätigkeit N =	24			
4.16 min.	Beantworten von MMPI 50 Items			
Tätigkeit N =	6	6	6	6
5 min.	Reizung H2 linke Hand	Reizung H2 rechte Hand	Reizung H2 linke Hand	Reizung H2 rechte Hand
Tätigkeit N =	12		12	
5 min.	Schreiben Pro-Qwertz Satz		Schreiben Contra-Qwertz Satz	
Tätigkeit N =	24			
30 sek.	Messen der Fingertemperatur und VAS			
Tätigkeit N =	24			
4.16 min.	Beantworten von MMPI 50 Items			
Tätigkeit N =	6	6	6	6
5 min.	Reizung K1 linke Hand	Reizung K1 rechte Hand	Reizung K1 linke Hand	Reizung K1 rechte Hand
Tätigkeit N =	12		12	
5 min.	Schreiben Pro-Qwertz Satz		Schreiben Contra-Qwertz Satz	
Tätigkeit N =	24			
30 sek.	Messen der Fingertemperatur und VAS			
Tätigkeit N =	24			
4.16 min.	Beantworten von MMPI 50 Items			
Tätigkeit N =	6	6	6	6
5 min.	Reizung K2 linke Hand	Reizung K2 rechte Hand	Reizung K2 linke Hand	Reizung K2 rechte Hand
Tätigkeit N =	12		12	
5 min.	Schreiben Pro-Qwertz Satz		Schreiben Contra-Qwertz Satz	
Tätigkeit N =	24			
30 sek.	Messen der Fingertemperatur und VAS			
Tätigkeit N =	24			
4.16 min.	Beantworten von MMPI 50 Items			
Tätigkeit N =	6	6	6	6
5 min.	Reizung N1 linke Hand	Reizung N1 rechte Hand	Reizung N1 linke Hand	Reizung N1 rechte Hand
Tätigkeit N =	12		12	
5 min.	Schreiben Pro-Qwertz Satz		Schreiben Contra-Qwertz Satz	
Tätigkeit N =	24			
30 sek.	Messen der Fingertemperatur und VAS			
Tätigkeit N =	24			
4.16 min.	Beantworten von MMPI 50 Items			
Tätigkeit N =	6	6	6	6
5 min.	Reizung N2 linke Hand	Reizung N2 rechte Hand	Reizung N2 linke Hand	Reizung N2 rechte Hand
Tätigkeit N =	12		12	
5 min.	Schreiben Pro-Qwertz Satz		Schreiben Contra-Qwertz Satz	
Tätigkeit N =	24			
30 sek.	Messen der Fingertemperatur und VAS			
Tätigkeit N =	24			
5 min.	Verabschiedung und Aufklärung der Pb			

Abbildung 39.Exemplarische Versuchsabfolge am Beispiel der Kombination

WH1H2K1K2N1N2. Die Tätigkeit N bezieht sich dagegen auf alle Probandinnen.

7.3 Ergebnisse Studie 2

7.3.1 Stichprobe

Die Teilnehmerinnen waren rechtshändige weibliche professionelle Schreibkräfte im Alter von 20 - 59 Jahren ($M = 41.8$ Jahre; $SD = 11.8$) mit langjähriger Erfahrung (von 4 bis 40 Jahren) im Zehn-Finger-Schreibsystem ($M = 19.1$ Jahre; $SD = 11.9$). Ihre durchschnittliche Anschlagsgeschwindigkeit betrug $M = 309.36$, $SD = 55.84$ Anschläge pro Minute (thermoneutral) und ihr Body Mass Index betrug durchschnittlich $M = 24.7$, $SD = 5.3$. Das Edinburgh Handedness Inventory ergab einen Wert von $M = 91.7$, $SD = 3.1$ (Rechtshändigkeit). Ihre berufliche Qualifikation ist in Abbildung 40 wiedergegeben.

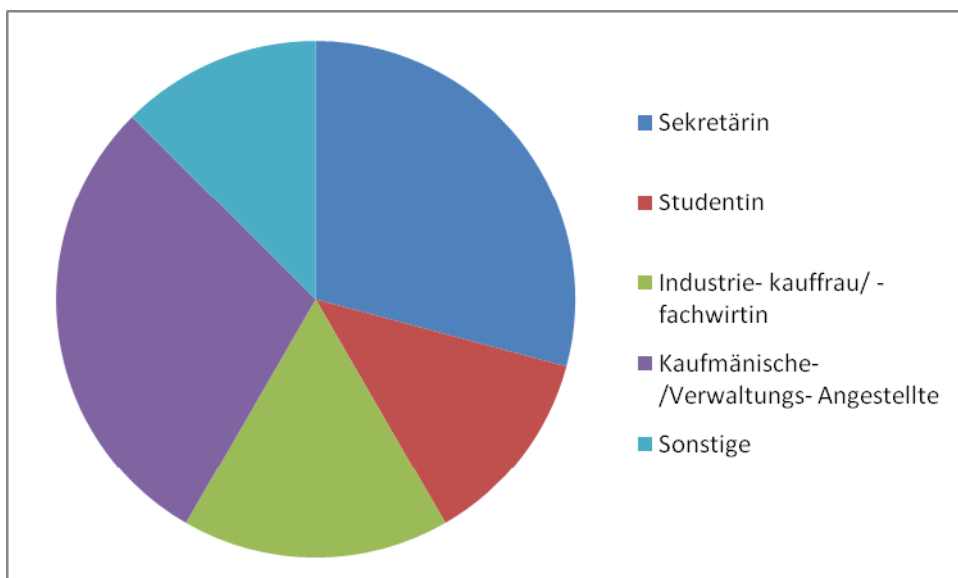


Abbildung 40. Berufliche Qualifikation der Probandinnen

7.3.2 Kontrollvariablen Befindlichkeit und Temperatur

7.3.2.1 Befindlichkeit

Die gemittelten Angaben der Befindlichkeitsitems (Angaben in cm auf einer 10cm langen VAS Skala von „stimmt nicht“ = 0 bis „stimmt“ = 10) in allen Bedingungskombinationen von 24 Probandinnen sind in den Tabellen 21-24 dargestellt. Eine dreifaktorielle MANOVA mit Messwiederholung (Messwiederholungsfaktor Art des Stressors, Zwischensubjektfaktoren Reizort und Satzart) über alle Items ergab keine signifikanten Unterschiede, zudem konnten die Statistiken des Innersubjektfaktors (multivariate Tests) aufgrund ungenügender Residuen-Freiheitsgrade nicht erstellt werden.

Tabelle 21a-f

Mittlere Item-Antworten in mm (von stimmt nicht = 0 bis stimmt = 10) über N=24

Probandinnen in den Bedingungskombinationen P-Q = zu schreibender Satz, der zu 32.5% aus rechts und 67.5% links getippten Tasten besteht; C-Q = zu schreibender Satz, der zu 65.9% aus rechts und 34.1% aus links getippten Tasten besteht; Rechts = Reizung an rechter Hand; Links = Reizung an linker Hand; Kälte = 8 Grad Celsius, Thermoneutral = 32 Grad Celsius, Hitze = 42 Grad Celsius.

(a) „Das Schreiben fällt mir einfach, es ist wie immer.“

Bedingung	Reiz-Ort	Satz	M	SD
Kälte	Rechts	P-Q	5.51	3.31
		C-Q	6.15	2.97
	Links	P-Q	6.39	3.46
		C-Q	4.95	3.58
Thermoneutral	Rechts	P-Q	7.22	3.51
		C-Q	6.44	3.66
	Links	P-Q	7.31	2.08
		C-Q	7.21	3.21
Hitze	Rechts	P-Q	6.63	3.39
		C-Q	7.71	2.13
	Links	P-Q	7.40	3.67
		C-Q	6.82	3.05

(b) „Ich fühle mich wohl.“

Bedingung	Reiz-Ort	Satz	M	SD
Kälte	Rechts	P-Q	8.99	1.49
		C-Q	8.71	1.41
	Links	P-Q	8.16	2.92
		C-Q	8.08	2.72
Thermoneutral	Rechts	P-Q	8.65	1.69
		C-Q	8.46	1.47
	Links	P-Q	8.30	2.26
		C-Q	8.92	2.13
Hitze	Rechts	P-Q	9.26	.99
		C-Q	8.48	1.62
	Links	P-Q	8.12	3.00
		C-Q	8.80	1.91

(c) „Die Beweglichkeit m. linken Hand ist eingeschränkt.“

Bedingung	Reiz-Ort	Satz	M	SD
Kälte	Rechts	P-Q	.28	.47
		C-Q	.82	1.29
	Links	P-Q	5.40	4.02
		C-Q	3.54	3.04
Thermoneutral	Rechts	P-Q	.97	1.28
		C-Q	1.50	2.54
	Links	P-Q	1.72	1.90
		C-Q	.75	1.54
Hitze	Rechts	P-Q	1.78	4.02
		C-Q	1.28	2.51
	Links	P-Q	2.90	3.16
		C-Q	.21	.18

(d) „Die Beweglichkeit m. rechten Hand ist eingeschränkt.“

Bedingung	Reiz-Ort	Satz	M	SD
Kälte	Rechts	P-Q	5.14	4.49
		C-Q	2.72	3.1
	Links	P-Q	.57	1.12
		C-Q	2.84	1.89
Thermoneutral	Rechts	P-Q	2.69	3.95
		C-Q	3.13	4.02
	Links	P-Q	1.04	1.5
		C-Q	1.0	1.47
Hitze	Rechts	P-Q	3.61	4.19
		C-Q	1.35	2.46
	Links	P-Q	1.0	1.51
		C-Q	1.12	1.57

(e) „Ich habe Schmerzen in der linken Hand.“

Bedingung	Reiz-Ort	Satz	M	SD
Kälte	Rechts	P-Q	.15	.08
		C-Q	1.64	3.38
	Links	P-Q	.68	.96
		C-Q	.32	.52
Thermoneutral	Rechts	P-Q	.24	.27
		C-Q	1.41	2.70
	Links	P-Q	.31	.35
		C-Q	.73	1.44
Hitze	Rechts	P-Q	1.86	3.99
		C-Q	1.55	3.16
	Links	P-Q	1.25	1.77
		C-Q	.20	.24

(f) „Ich habe Schmerzen in der rechten Hand.“

Bedingung	Reiz-Ort	Satz	M	SD
Kälte	Rechts	P-Q	1.40	1.66
		C-Q	1.86	3.29
	Links	P-Q	1.25	2.74
		C-Q	.85	1.79
Thermoneutral	Rechts	P-Q	.10	.10
		C-Q	2.94	4.20
	Links	P-Q	.35	.43
		C-Q	1.05	1.82
Hitze	Rechts	P-Q	.11	.09
		C-Q	1.79	3.06
	Links	P-Q	.35	.53
		C-Q	.79	1.60

Tabelle 22a-f

Mittlere Item-Antworten mm (von stimmt nicht = 0 bis stimmt = 10) über N=24 Probandinnen in den Bedingungskombinationen. P-Q = zu schreibender Satz, der zu 32.5% aus rechts und 67.5% links getippten Tasten besteht; C-Q = zu schreibender Satz, der zu 65.9% aus rechts und 34.1% aus links getippten Tasten besteht; Rechts = Reizung an rechter Hand; Links = Reizung an linker Hand; Kälte = 8 Grad Celsius, Thermoneutral = 32 Grad Celsius, Hitze = 42 Grad Celsius.

(a),,Ich habe Schmerzen im linken Unterarm.“

Bedingung	Reiz-Ort	Satz	M	SD
Kälte	Rechts	P-Q	.15	.08
		C-Q	1.85	3.89
	Links	P-Q	.28	.37
		C-Q	.21	.29
Thermoneutral	Rechts	P-Q	.19	.17
		C-Q	1.70	3.38
	Links	P-Q	.34	.41
		C-Q	.25	.32
Hitze	Rechts	P-Q	1.54	3.24
		C-Q	1.83	3.78
	Links	P-Q	1.11	1.75
		C-Q	.19	.23

(c),,Ich habe Schmerzen im rechten Oberarm.“

Bedingung	Reiz-Ort	Satz	M	SD
Kälte	Rechts	P-Q	.15	.12
		C-Q	1.82	3.81
	Links	P-Q	.27	.36
		C-Q	.47	.58
Thermoneutral	Rechts	P-Q	.15	.16
		C-Q	1.78	3.66
	Links	P-Q	.33	.42
		C-Q	.24	.28
Hitze	Rechts	P-Q	.91	1.85
		C-Q	1.76	3.67
	Links	P-Q	.80	1.60
		C-Q	.20	.26

(e),,Ich habe Schmerzen im Schulter-/Nackengebiet.“

Bedingung	Reiz-Ort	Satz	M	SD
Kälte	Rechts	P-Q	.49	.53
		C-Q	2.02	3.71
	Links	P-Q	1.07	2.20
		C-Q	1.56	3.20
Thermoneutral	Rechts	P-Q	.44	.61
		C-Q	1.72	3.27
	Links	P-Q	1.63	3.03
		C-Q	.75	1.52
Hitze	Rechts	P-Q	1.31	1.91
		C-Q	2.09	3.54
	Links	P-Q	.49	.73
		C-Q	1.07	1.47

(b),,Ich habe Schmerzen im rechten Unterarm.“

Bedingung	Reiz-Ort	Satz	M	SD
Kälte	Rechts	P-Q	.15	.09
		C-Q	1.82	2.98
	Links	P-Q	1.20	2.53
		C-Q	1.44	2.39
Thermoneutral	Rechts	P-Q	.11	.13
		C-Q	3.24	4.59
	Links	P-Q	.99	1.97
		C-Q	1.11	1.42
Hitze	Rechts	P-Q	.10	.11
		C-Q	1.81	3.71
	Links	P-Q	.24	.33
		C-Q	1.62	2.10

(d),,Ich habe Schmerzen im linken Oberarm.“

Bedingung	Reiz-Ort	Satz	M	SD
Kälte	Rechts	P-Q	.14	.09
		C-Q	1.53	3.09
	Links	P-Q	.30	.44
		C-Q	1.14	2.50
Thermoneutral	Rechts	P-Q	.93	1.97
		C-Q	1.95	2.66
	Links	P-Q	1.09	1.39
		C-Q	.65	1.32
Hitze	Rechts	P-Q	.10	.10
		C-Q	1.52	2.21
	Links	P-Q	.25	.29
		C-Q	.78	1.56

(f),,Ich habe Schmerzen im Rücken.“

Bedingung	Reiz-Ort	Satz	M	SD
Kälte	Rechts	P-Q	1.10	1.50
		C-Q	1.92	3.74
	Links	P-Q	.32	.43
		C-Q	1.41	3.17
Thermoneutral	Rechts	P-Q	1.41	2.12
		C-Q	1.74	3.29
	Links	P-Q	.65	.77
		C-Q	.35	.50
Hitze	Rechts	P-Q	1.22	1.50
		C-Q	1.80	3.55
	Links	P-Q	.38	.52
		C-Q	.49	.77

Zur weiteren Überprüfung der Hypothese, ob nach Kälteapplikation Befindlichkeit als schlechter und die Beweglichkeit als geringer eingestuft wird, sind die Items b, e, f der Tabelle 21 sowie die Items a-f der Tabelle 22 zu Befindlichkeit und die Items 21a, 21c, 21d zu Bewegungseinschränkung via arithmetischem Mittel zusammengefasst. Anschließend wurden je drei t-Tests über die neuen Variablen Befindlichkeit und Bewegungseinschränkung gerechnet. Dies ergab keine signifikanten Unterschiede.

Tabelle 23

Mittlere Befindlichkeit (Mittelung der Items 21b, 22a-f) nach fünfminütigem Schreiben mit vorheriger thermischer Reizung durch Kälte = 8 Grad Celsius, Thermoneutral = 32 Grad Celsius, Hitze = 42 Grad Celsius von N=24 Probandinnen.

Vergleich	VAS in cm			Diff.	t	p	Cohens d
	Befindlichkeit						
Kälte – Neutral	1.807 (1.666)	<	1.814 (1.448)	-0.007	-.053	.824	.004
Kälte – Hitze	1.807 (1.666)	<	1.841 (1.536)	-0.034	-.225	.958	.02
Hitze – Neutral	1.841 (1.536)	>	1.814 (1.448)	0.027	.150	.882	.01

N=24; df=23; t-Test für abhängige Stichproben

Tabelle 24

Mittlere Bewegungseinschränkung (Mittelung der Items 21a, c, d) nach fünfminütigem Schreiben vorheriger thermischer Reizung durch Kälte = 8 Grad Celsius, Thermoneutral = 32 Grad Celsius, Hitze = 42 Grad von N=24 Probandinnen.

Vergleich	VAS in cm			Diff.	t	p	Cohens d
	Beweglichkeit						
Kälte – Neutral	3.697(1.177)	>	3.420(1.185)	0.277	.893	.190	.23
Kälte – Hitze	3.697(1.177)	>	3.488(.982)	0.209	1.911	.353	.19
Hitze – Neutral	3.488(.982)	>	3.420(1.185)	0.068	.874	.195	.06

N=24; df=23; t-Test für abhängige Stichproben

7.3.2.2 Temperaturen

Zur Kontrolle der an der Hand applizierten thermischen Reizung wurden zum Vergleich der experimentellen Bedingungen mit der Warmschreibebedingung sechs t-Tests gerechnet. Es zeigt sich, dass nach Schreiben unter vorheriger fünfminütiger 42 Grad- sowie unter vorheriger fünfminütiger 8 Grad- Reizung ein Unterschied zur rechten und linken Fingertemperatur nach einminütigem Warmschreiben besteht. Zwischen der Messung nach Warmschreiben und der experimentellen thermoneutralen Bedingung ist rechts (Tabelle 25) wie links (Tabelle 26) kein Unterschied zu verzeichnen.

Tabelle 25

Mittlere Temperatur der rechten Fingerspitze nach fünfminütigem Schreiben bei vorheriger thermischer Reizung durch Kälte = 8 Grad Celsius, Thermoneutral = 32 Grad Celsius, Hitze = 42 Grad Celsius Reizung und der Warmschreibebedingung.

Vergleich	Temperatur			Diff.	t	p	Cohens d
Warm – Kälte	30.34(3.75)	>	26.58(4.37)	3.76	4.489	.000	.92
Warm – Hitze	30.34(3.75)	<	31.75(3.55)	-1.41	-1.911	.069	.39
Warm – Neutral	30.34(3.75)	>	29.49(3.94)	0.84	1.139	.266	.22

N=24; df=23; t-Test für abhängige Stichproben

Tabelle 26

Mittlere Temperatur der linken Fingerspitze nach fünfminütigem Schreiben bei vorheriger thermischer Reizung durch Kälte = 8 Grad Celsius, Thermoneutral = 32 Grad Celsius, Hitze = 42 Grad Celsius Reizung und der Warmschreibebedingung.

Vergleich	Temperatur			Diff.	t	p	Cohens d
Warm - Kälte	30.39(4.01)	>	26.90(4.25)	3.49	3.937	.001	.84
Warm – Hitze	30.39(4.01)	<	32.57(2.59)	-2.18	-3.300	.003	.64
Warm – Neutral	30.39(4.01)	>	29.96(3.68)	-.43	-.015	.528	.11

N=24; df=23; t-Test für abhängige Stichproben

7.3.3 Schreibparameter

7.3.3.1 Anschläge pro Minute (ApM)

Die Anschläge pro Minute wurden als die Anzahl geleisteter Zeichen geteilt durch fünf Minuten für alle Pbn in den Bedingungskombinationen berechnet (siehe Abb. 40).

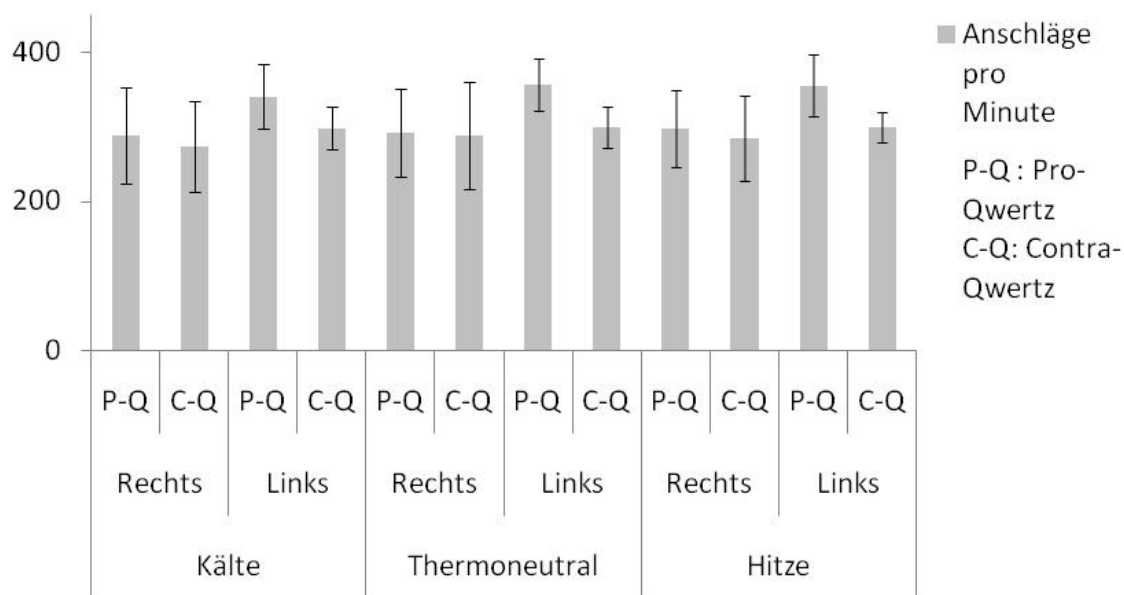


Abbildung 41. Tippgeschwindigkeit von N= 24 Probandinnen in den Bedingungskombinationen: Contra-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 65.9% aus rechts und 34.1% aus links getippten Tasten besteht; Pro-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 32.5% aus rechts und 67.5% links getippten Tasten besteht; Rechts = Reizung rechte Hand; Links = Reizung linke Hand; Kälte = 8 Grad Celsius, Thermoneutral = 32 Grad Celsius, Hitze = 42 Grad Celsius.

Zur Überprüfung der Hypothese, ob durch Kälteapplikation der Hand weniger Anschläge gemacht werden, wurden alle Anschläge pro Minute in den thermischen Bedingungen gemittelt und mittels t-Tests für abhängige Stichproben überprüft. (siehe Tab.27). Unter vorheriger 8 Grad Celsius-Reizung wurden signifikant weniger Anschläge ($M = 300.39$, $SD = 54.06$ ApM) im Vergleich zur 32 Grad Celsius- ($M = 309.36$, $SD = 55.84$ ApM) und 42 Grad Celsius- ($M = 309.44$, $SD = 50.54$ ApM) Bedingung gemacht.

Tabelle 27

Vergleich der über ($N=24$) gemittelten Anschläge pro Minute (ApM) zwischen den thermischen Bedingungen Kälte, Neutral und Hitze.

Vergleich	ApM		Diff.	t	p	Cohens d
Kälte – Neutral	300.39(54.06)	< 309.36(55.84)	-8.97	-1.958	.031	.16
Kälte – Hitze	300.39(54.06)	< 309.44(50.54)	-9.04	-1.746	.047	.17
Hitze – Neutral	309.44(50.54)	> 309.36(55.84)	.075	.015	.474	.001

$N=24$; $df=23$; t-Test für abhängige Stichproben

7.3.3.2 Tastendruckdauer (TDD)

Zur Analyse der rechten und linken Tastendruckdauer wurde der Median des über die Tastenanschläge gemittelten Trigger-Signals in jeweils einer Bedingungskombination pro Probandin herangezogen und über alle Probandinnen in dieser Bedingungskombination gemittelt (siehe Abb. 41 und 42).

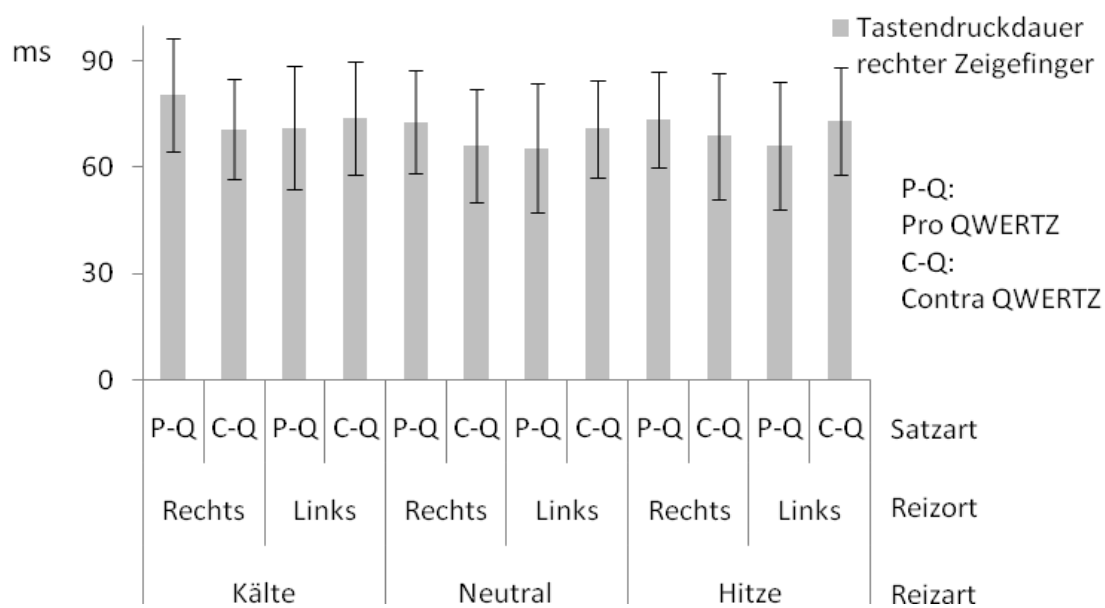


Abbildung 42. Mittlere Tastendruckdauer ($N=6$) vom rechten Zeigefinger in den Bedingungskombinationen. Contra-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 65.9% aus rechts und 34.1% aus links getippten Tasten besteht; Pro-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 32.5% aus rechts und 67.5% links getippten Tasten besteht; Rechts = Reizung an rechter Hand; Links = Reizung an linker Hand; Kälte = 8 Grad Celsius, Thermoneutral = 32 Grad Celsius, Hitze = 42 Grad Celsius.

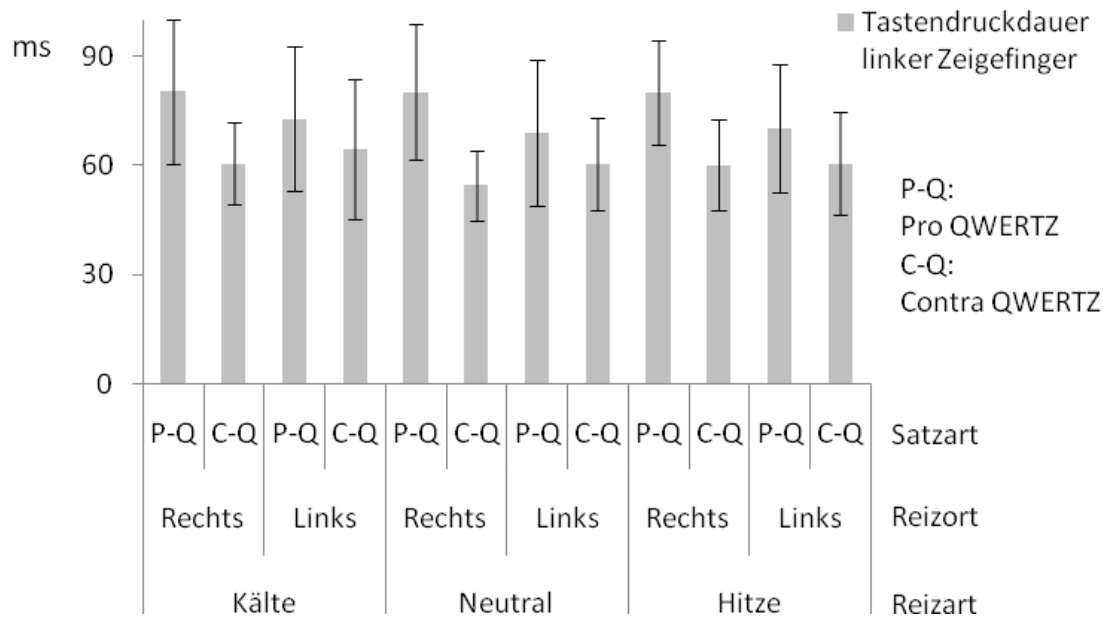


Abbildung 43. Mittlere Tastendruckdauer (N=6) vom linken Zeigefinger in den Bedingungskombinationen. Contra-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 65.9% aus rechts und 34.1% aus links getippten Tasten besteht; Pro-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 32.5% aus rechts und 67.5% links getippten Tasten besteht; Rechts = Reizung an rechter Hand, Links = Reizung an linker Hand; Kälte = 8 Grad Celsius, Thermoneutral = 32 Grad Celsius, Hitze = 42 Grad Celsius.

Um zu überprüfen, ob durch Kälteapplikation der Hand die Tastendruckdauer länger dauert, wurden die Tastenanschlagszeiten getrennt nach rechtem und linkem Zeigefinger in den thermischen Bedingungen gemittelt und mittels t-Tests für abhängige Stichproben überprüft (siehe Tab. 28 und 29). Dies ergab im rechten Zeigefinger eine signifikant erhöhte Tastendruckdauer unter 8 Grad Celsius ($M = 74$, $SD = 15.31\text{ms}$) im Vergleich zur 42 Grad Celsius- ($M = 70.33$, $SD = 15.44\text{ms}$) und zur 32 Grad Celsius-Bedingung ($M = 68.79$, $SD = 15.06\text{ms}$). Im linken Zeigefinger unterschied sich die Tastendruckdauer unter 8 Grad Celsius ($M = 69.54$, $SD = 18.42\text{ms}$) signifikant von der 32 Grad Celsius- ($M = 66$, $SD = 17.70\text{ms}$), jedoch nicht von der 42 Grad Celsius- ($M = 67.75$, $SD = 15.44\text{ms}$) Bedingung.

Tabelle 28

Vergleich der über (N=24) gemittelten Tastendruckdauer des rechten Zeigefingers (TDDR) zwischen den thermischen Bedingungen Kälte, Neutral und Hitze.

Vergleich	TDDR ms			Diff.	t	p	Cohens d
Kälte – Neutral	74(15.31)	>	68.79(15.06)	5.21	2.554	.009	.34
Kälte – Hitze	74(15.31)	>	70.33 (15.44)	3.67	1.735	.048	.24
Hitze – Neutral	70.33 (15.44)	>	68.79(15.06)	1.54	-2.329	.014	.10

N=24; df=23; t-Test für abhängige Stichproben

Tabelle 29

Vergleich der über (N=24) gemittelten Tastendruckdauer des linken Zeigefingers (TDDL) zwischen den thermischen Bedingungen Kälte, Neutral und Hitze.

Vergleich	TDDL ms			Diff.	t	p	Cohens d
Kälte – Neutral	69.54(18.42)	>	66(17.70)	3.54	2.219	.019	.20
Kälte – Hitze	69.54(18.42)	>	67.75(16.03)	1.79	.825	.209	.10
Hitze – Neutral	67.75(16.03)	>	66(17.70)	1.75	-1.052	.152	.10

N=24; df=23; t-Test für abhängige Stichproben

7.3.3.3 Schreibfehler

Um zu überprüfen, ob beim Tastschreiben unter vorheriger Kältereizung mehr Fehler gemacht werden als unter thermoneutraler Reizung, wurden über die zusammengefassten Fehlerquotienten für beide Sätze: „neuer boxer nahm obies antrag bis fanfare blies“ und „nejil bozul nahm obulujantuch bis manti ombikte“ t-Tests über die thermischen Bedingungen gerechnet (Tab. 30). Es ergaben sich Fehlerquotienten von $M = 1.53$, $SD = 1.11\%$ bis $M = 1.70$, $SD = 1.35\%$, die sich jedoch in den unterschiedlichen thermischen Bedingungen nicht voneinander unterschieden.

Tabelle 30

Vergleich der mittleren Fehlerquotienten (in Prozent) der Sätze: „neuer boxer nahm obies antrag bis fanfare blies“ (Pro-QWERTZ) und „nejil bozul nahm obulujantuch bis manti ombikte“ (Contra-QWERTZ) bei fünfminütigem Schreiben von N=24 professionellen Schreibkräften nach vorheriger thermischer Reizung durch Kälte, Neutral oder Hitze.

Vergleich	Fehlerquotient %			Diff.	t	p	Cohens d
Kälte - Neutral	1.70(1.35)	>	1.63(1.22)	0.06	.631	.534	.05
Kälte - Hitze	1.70(1.35)	>	1.53(1.11)	0.17	1.388	.178	.13
Hitze - Neutral	1.53(1.11)	<	1.63(1.22)	-0.11	1.128	.271	.08

N=24; df=23; t-Test für abhängige Stichproben

7.3.4 Ereigniskorreliertes EMG

Die Auswertung des ereigniskorrelierten EMG erfolgte nach Kanälen durch Zuordnung zu den Trigger-Signalen („n“ oder „b“-Taste), Suchen und Entfernen ungültiger Tastendrucke (zu lange oder zu kurze Pre-Trigger-Phasen), Gleichrichtung, Umrechnung in μ Volt, Aggregation der Daten, Analyse der Zeitreihen, Beseitigung der seriellen Abhängigkeit (vgl. Revenstorf, 1979) und inferenzstatistische Berechnung. Nach Gleichrichtung wurde die Muskelaktivität aller vier Muskeln im 340 ms-Intervall über alle Tastenanschläge aggregiert und dann über alle Pbn je Bedingungskombination gemittelt. Man erhält pro Tastendruck je nachdem, ob mit rechts oder links gedrückt wurde, vier von acht EK-EMG Kurven (siehe Tabelle 31).

Tabelle 31

Bezeichnung der acht ereigniskorrelierten EMG-Kurven und ihrer Abkürzungen

Muskel bei Tastendruck	Abkürzung
Strecker rechts, wenn rechts drückt	SRR
Beuger rechts, wenn rechts drückt	BRR
Strecker links, wenn rechts drückt	SLR
Beuger links, wenn rechts drückt	BLR
Strecker rechts, wenn links drückt	SRL
Beuger rechts, wenn links drückt	BRL
Strecker links, wenn links drückt	SLL
Beuger links, wenn links drückt	BLL

Diese sind in unterschiedlichen Bedingungskombinationen unterteilt und in Abbildung 44-47 a-l dargestellt.

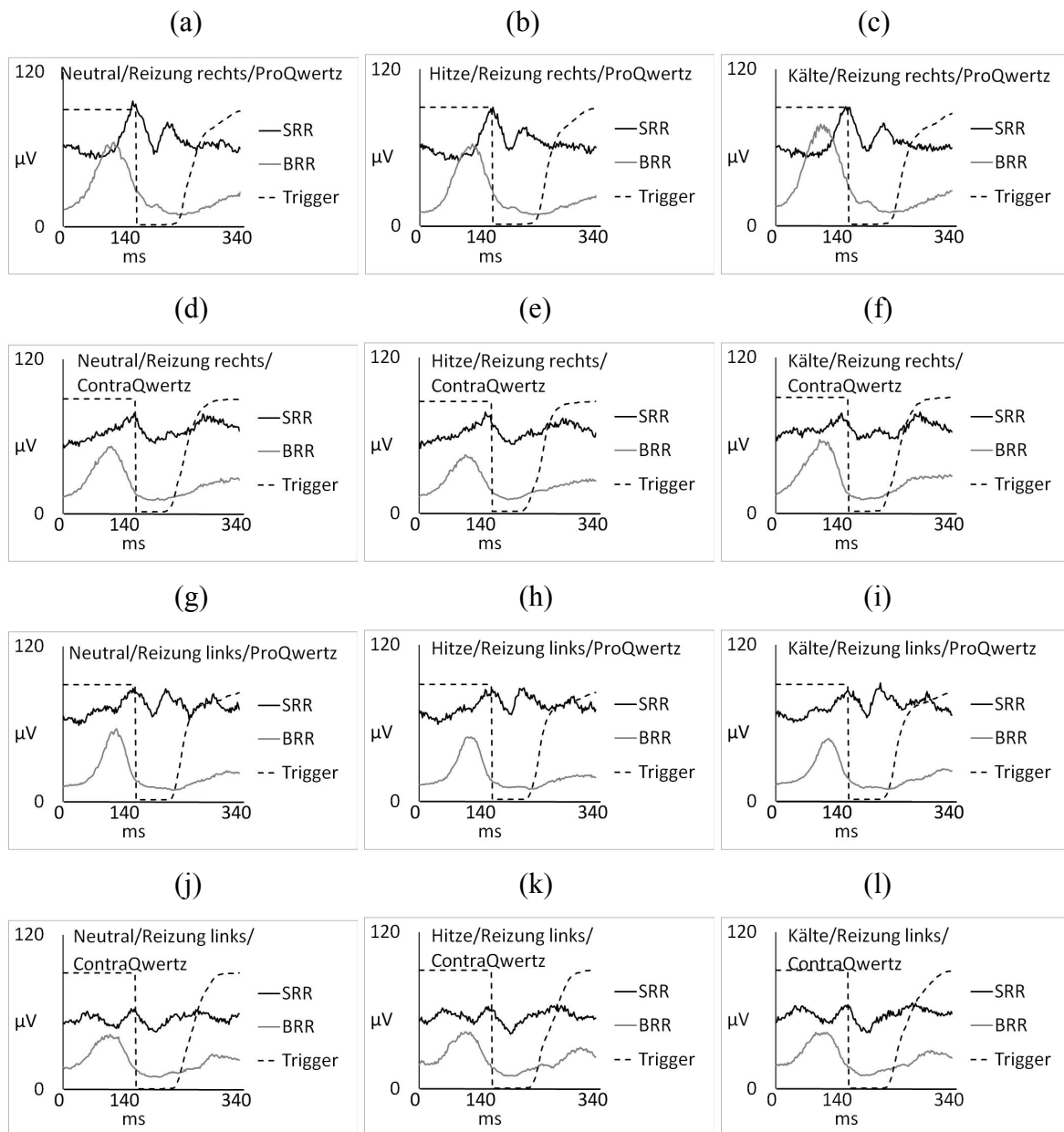


Abbildung 44 a-l. Grand Mean des ereigniskorrelierten EMG von Beuger und Strecker des rechten Armes (N=6) bei Tastendruck rechts in allen Bedingungskombinationen. SRR = EMG Strecker rechts, wenn rechter Zeigefinger drückt; BRR = EMG Beuger rechts, wenn rechter Zeigefinger drückt; Trigger = Signal zur Darstellung des Tastendrucks (Beginn des Gedrückthaltes bei 140ms, auf Grund unterschiedlicher intra- und interindividueller summierter Anschlagszeiten variiert das Loslassen der Taste und ergibt einen kurvenförmigen Verlauf des Triggersignals); Contra-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 65.9% aus rechts und 34.1% aus links getippten Tasten besteht; Pro-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 32.5% aus rechts und 67.5% links getippten Tasten besteht).

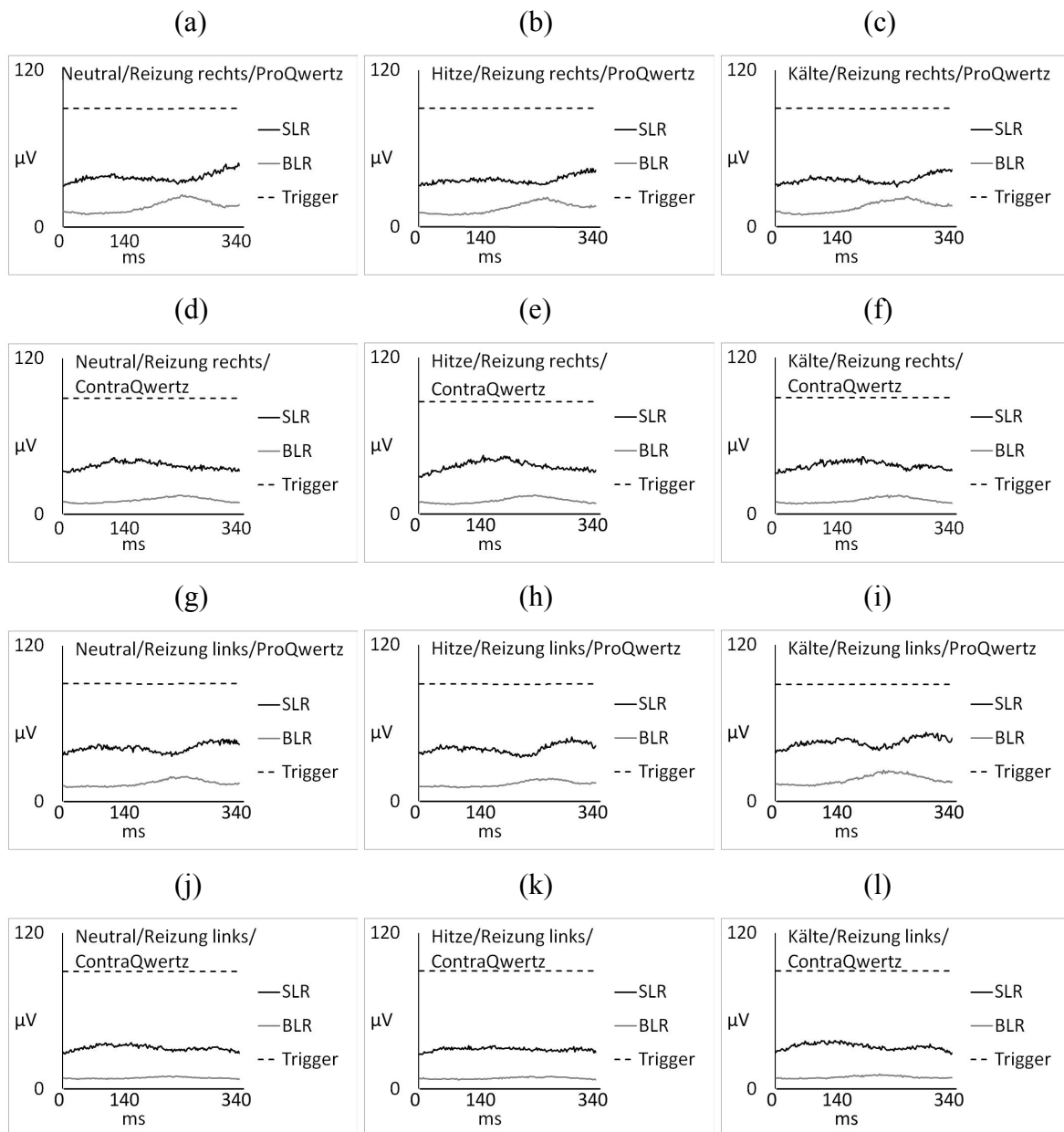


Abbildung 45 a-l. Grand Mean des ereigniskorrelierten EMG von Beuger und Strecker des linken Armes (N=6) bei Tastendruck rechts in allen Bedingungskombinationen. SLR = EMG Strecker links, wenn rechter Zeigefinger drückt; BLR = EMG Beuger links, wenn rechter Zeigefinger drückt; Trigger = Signal zur Darstellung des Tastendrucks; Contra-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 65.9% aus rechts und 34.1% aus links getippten Tasten besteht; Pro-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 32.5% aus rechts und 67.5% links getippten Tasten besteht).

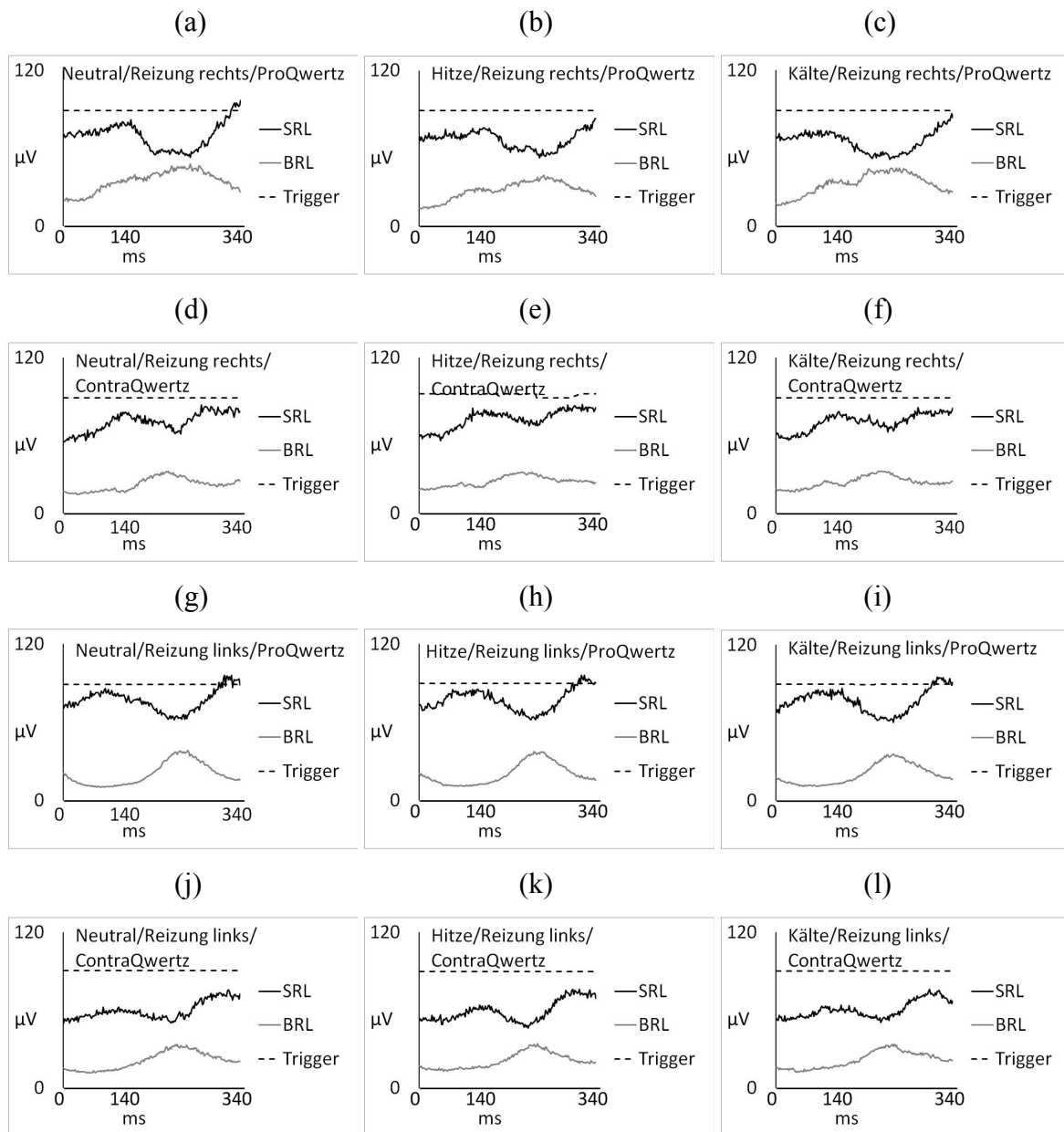


Abbildung 46 a- l. Grand Mean des ereigniskorrelierten EMG von Beuger und Strecker des rechten Armes (N=6) bei Tastendruck links in allen Bedingungskombinationen. SRL = EMG Strecker rechts, wenn linker Zeigefinger drückt; BRL = EMG Beuger rechts, wenn linker Zeigefinger drückt; Trigger = Signal zur Darstellung des Tastendrucks; Contra-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 65.9% aus rechts und 34.1% aus links getippten Tasten besteht; Pro-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 32.5% aus rechts und 67.5% links getippten Tasten besteht).

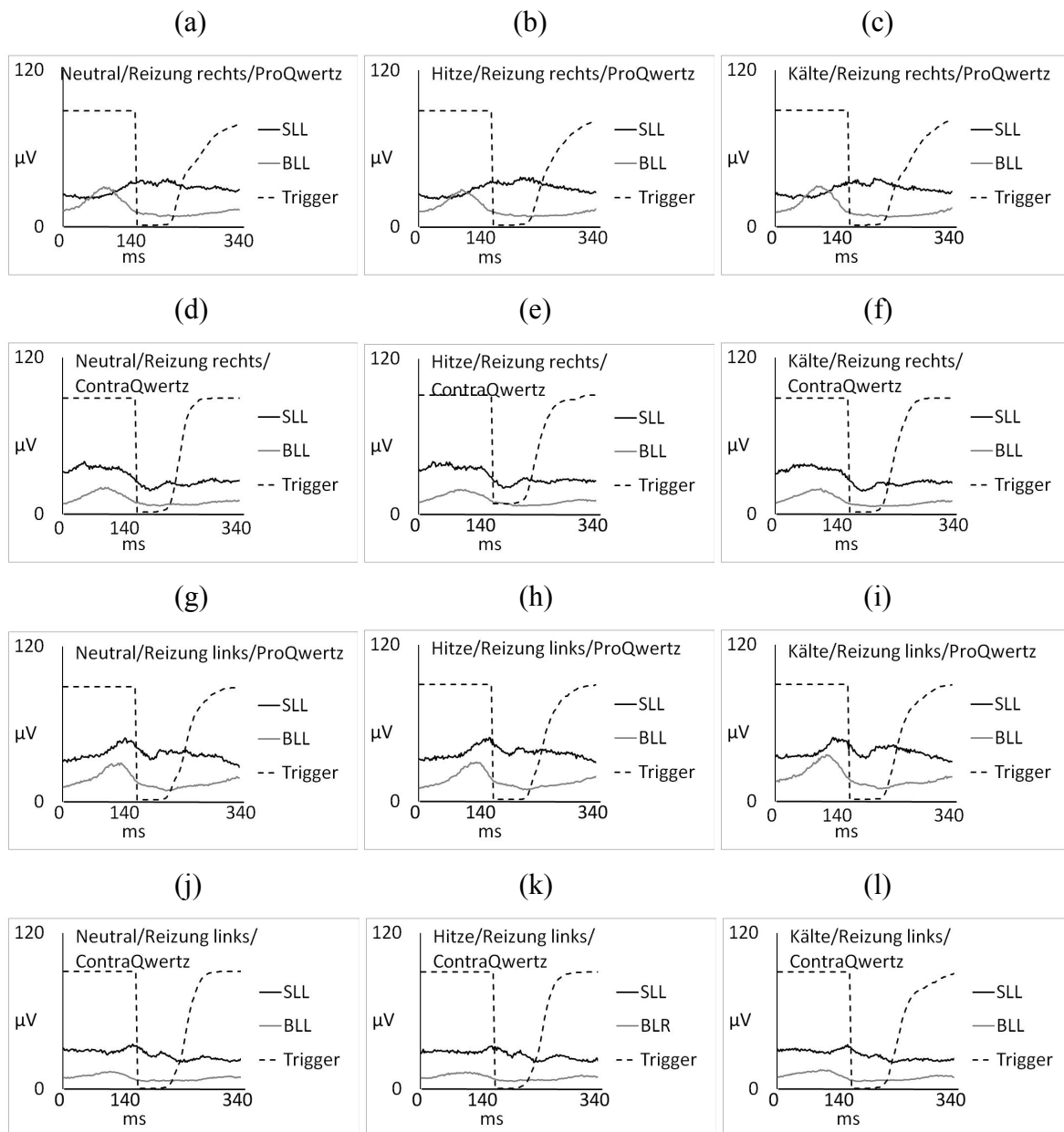


Abbildung 47 a-l. Grand Mean des ereigniskorrelierten EMG von Beuger und Strecker des linken Armes (N=6) bei Tastendruck links in allen Bedingungskombinationen. SLL = EMG Strecker links, wenn linker Zeigefinger drückt; BLL = EMG Beuger links, wenn linker Zeigefinger drückt; Trigger = Signal zur Darstellung des Tastendrucks (Beginn des Gedrückthaltes bei 140ms, auf Grund unterschiedlicher intra- und interindividueller summierter Anschlagszeiten variiert das Loslassen der Taste und ergibt einen kurvenförmigen Verlauf des Triggersignals); Contra-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 65.9% aus rechts und 34.1% aus links getippten Tasten besteht; Pro-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 32.5% aus rechts und 67.5% links getippten Tasten besteht).

Zur weiteren Auswertung wurden, analog zur Studie 1, nur die Daten von 140ms vor dem Tastendruck herangezogen, da spätere zeitliche Verläufe nicht mehr auf ein eindeutiges Ereignis zurückführbar sind („time-jitter“). Anschließend wurden die EMG-Zeitreihen nach Trends analysiert. Nach Identifizierung des Trends mit der größten Varianzaufklärung wurde dieser durch Subtraktion von der ursprünglichen Zeitreihe eliminiert. Daraufhin wurden die verbleibenden Residuen mit dem Mittelwert der ursprünglichen Zeitreihe addiert. Die pro Bedingung gemittelten korrigierten Zeitreihen aller Probandinnen stellten die Ausgangswerte für weitere Berechnungen dar.

In einem weiteren Schritt wurden die Mittelwerte der über einen Reizort gemittelten Zeitreihen der einzelnen thermischen Bedingungen berechnet. Dies sei am Beispiel des linken Tastendrucks bei linker Kältereizung am linken Beuger und Strecker verdeutlicht: Dabei wurden zuerst pro Muskel die mittlere EMG-Kurve 140ms vor dem Tastendruck aus Abbildung 47 i und l errechnet (70 Werte) und anschließend jeweils der Mittelwert (ein Wert) dieser gemittelten Kurve bestimmt. Die Art des Satzes blieb somit unberücksichtigt. Analog wurde beim rechten Reizort, mit weiteren thermischen Bedingungen und mit dem rechten Arm verfahren. Abbildung 48 stellt diese Mittelwerte dar und gibt eine Übersicht, an welchem Arm welcher Muskel durch welche Reizung wie hoch aktiviert ist.

Nach der deskriptiven Darstellung wurde mit mehreren Wilcoxon-Tests (aufgrund signifikanter Box- und Levene- Tests) überprüft, ob unter vorheriger Kältereizung (Tabelle 32 – 35) die Muskelaktivität der gereizten Seite während eines Tastendrucks steigt und ob unter vorheriger Hitzereizung die Muskelaktivität der gereizten Seite während eines Tastendrucks abnimmt. Dabei wurden die Muskelaktivitäten der gereizten Seite während eines Tastendrucks oder ohne Tastendruck in den thermischen Bedingungen miteinander verglichen.

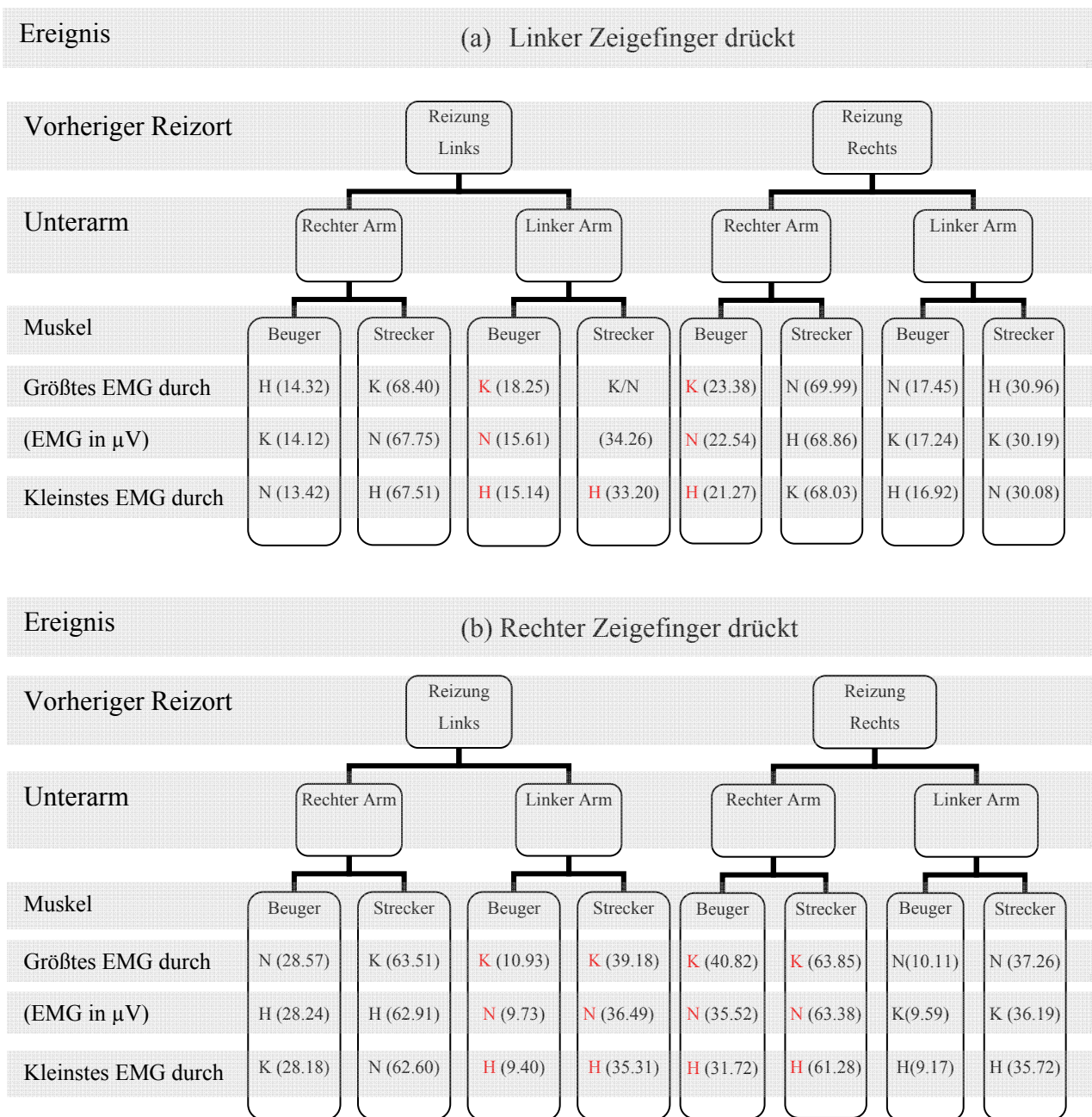


Abbildung 48: Zusammenfassung der Wirkungsweise unterschiedlicher thermischer (K = 8 Grad Celsius, N = 32 Grad Celsius, H = 42 Grad Celsius) Reizungen auf nachfolgende ereigniskorrelierte EMG-Abnahme der rechten und linken Beuger- und Streckermuskulatur von 140ms vor dem linken (a) oder rechten (b) Tastendruck bei fünfminütigem Tastschreiben.

Für den linken Tastendruck ergeben sich im linken Beuger nach ipsilateraler Reizung von 8 Grad Celsius signifikant höhere Werte ($M = 18.25$, $SD = 0.71\mu V$) als nach 32 Grad Celsius ($M = 15.61$, $SD = 0.72\mu V$) und nach 42 Grad Celsius Applizierung ($M = 15.14$, $SD = 0.54\mu V$). Der linke Strecker zeigt dabei keinen Unterschied zwischen vorheriger kalter ($M = 34.26$, $SD = 0.94\mu V$) oder thermoneutraler ($M = 34.26$, $SD = 0.89\mu V$) Reizung. Lediglich die 42 Grad Celsius Bedingung ($M = 33.20$, $SD = 0.77\mu V$) zeigt einen signifikanten Unterschied zur thermoneutralen und Kältereizung. Gleichzeitig zeigen sich im rechten Strecker nach 32 Grad Celsius rechter Reizung signifikant höhere Werte ($M = 69.99$, $SD = 1.50\mu V$) als nach 42 Grad Celsius ($M = 68.86$, $SD = 1.39\mu V$) und 8 Grad Celsius ($M = 68.03$, $SD = 1.03\mu V$). Dabei zeigt die rechte Beugeraktivität bei Kälte signifikant höhere Aktivität ($M = 23.38$, $SD = 0.76\mu V$) als nach thermoneutraler Reizung ($M = 22.54$, $SD = 0.88\mu V$) oder nach Applizierung von Hitze ($M = 21.27$, $SD = 0.67\mu V$).

Tabelle 32

Vergleich der Grand Mean Strecker und Beuger-Aktivität (μV) Zeitreihe 140ms (70 Werte) vor dem linken Tastendruck im linken Unterarm zwischen Kälte (8° Grad Celsius), Neutral (32° Grad Celsius) und Hitze (42 Grad Celsius) bei linker Reizung.

Vergleich	μV		Differenz	z	p	Cohens d
Strecker Links (Kälte vs. Neutral)	34.26 (0.94)	-	34.26 (0.89)	0	-.628	.265
Beuger Links (Kälte vs. Neutral)	18.25 (0.71)	>	15.61 (0.72)	2.64	-7.272	.000
Strecker Links (Kälte vs. Hitze)	34.26 (0.94)	>	33.20 (0.77)	1.06	-6.868	.000
Beuger Links (Kälte vs. Hitze)	18.25 (0.71)	>	15.14 (0.54)	3.11	-7.271	.000
Strecker Links (Hitze vs. Neutral)	33.20 (0.77)	<	34.26 (0.89)	-1.06	-6.954	.000
Beuger Links (Hitze vs. Neutral)	15.14 (0.54)	<	15.61 (0.72)	-0.47	-6.113	.000

N = 70, Wilcoxon-Test.

Tabelle 33

Vergleich der Grand Mean Strecker- und Beuger-Aktivität (μV) Zeitreihe 140ms (70 Werte) vor dem linken Tastendruck im rechten Unterarm zwischen Kälte (8 Grad Celsius), Neutral (32 Grad Celsius) und Hitze (42 Grad Celsius) bei rechter Reizung.

Vergleich	μV		Differenz	z	p	<i>Cohens d</i>	
Strecker Rechts (Kälte vs. Neutral)	68.03 (1.03)	<	69.99 (1.50)	-1.96	-6.610	.000	1.52
Beuger Rechts (Kälte vs. Neutral)	23.38 (0.76)	>	22.54 (0.88)	0.84	-5.018	.000	1.02
Strecker Rechts (Kälte vs. Hitze)	68.03 (1.03)	<	68.86 (1.39)	-0.83	-3.713	.000	.67
Beuger Rechts (Kälte vs. Hitze)	23.38 (0.76)	>	21.27 (0.67)	2.11	-7.266	.000	2.94
Strecker Rechts (Hitze vs. Neutral)	68.86 (1.39)	<	69.99 (1.50)	-1.13	-4.819	.000	.78
Beuger Rechts (Hitze vs. Neutral)	21.27 (0.67)	<	22.54 (0.88)	-1.27	-7.225	.000	1.62

N = 70, Wilcoxon-Test.

Für den rechten Tastendruck ergeben sich im rechten Beuger nach ipsilateraler Reizung von 8 Grad Celsius signifikant höhere Werte ($M = 40.82$, $SD = 11.37\mu V$) als nach 32 Grad Celsius ($M = 35.52$, $SD = 2.10\mu V$) und nach 42 Grad Celsius Applizierung ($M = 31.72$, $SD = 1.95\mu V$). Im rechten Strecker zeigt sich unter Kälte ebenfalls signifikant höhere Aktivierung ($M = 63.85$, $SD = 1.79\mu V$) als nach Applizierung von thermoneutralem ($M = 63.38$, $SD = 1.30\mu V$) oder heißem Wasser ($M = 61.28$, $SD = 1.49\mu V$). Während des rechten Tastendrucks zeigen sich nach 8 Grad Celsius Reizung der linken Hand im linken Strecker signifikant höhere Werte ($M = 39.81$, $SD = 0.72\mu V$) als nach 32 Grad Celsius ($M = 36.49$, $SD = 0.87\mu V$) und 42 Grad Celsius ($M = 35.31$, $SD = 0.61\mu V$). Dieser ähnelt dabei dem linken Beuger, der nach Kälte ebenfalls signifikant höhere Aktivität ($M = 10.93$, $SD = 0.19\mu V$) als nach thermoneutraler ($M = 9.73$, $SD = 0.21\mu V$) und Hitze-Reizung ($M = 9.40$, $SD = 0.18\mu V$) aufweist.

Tabelle 34

Vergleich der Grand Mean Strecker- und Beuger-Aktivität (μV) Zeitreihe 140ms (70 Werte) vor dem rechten Tastendruck im rechten Unterarm zwischen Kälte (8 Grad Celsius), Neutral (32 Grad Celsius) und Hitze (42 Grad Celsius) bei rechter Reizung.

Vergleich	μV		Differenz	z	p	<i>Cohens d</i>	
Strecker Rechts (Kalt vs. Neutral)	63.85 (1.79)	>	63.38 (1.30)	0.47	-2.010	.022	.30
Beuger Rechts (Kalt vs. Neutral)	40.82 (11.37)	>	35.52 (2.10)	5.30	-3.549	.000	.64
Strecker Rechts (Kalt vs. Heiß)	63.85 (1.79)	>	61.28 (1.49)	2.57	-7.002	.000	1.56
Beuger Rechts (Kalt vs. Heiß)	40.82 (11.37)	>	31.72 (1.95)	9.10	-5.305	.000	1.11
Strecker Rechts (Neutral vs. Heiß)	63.38 (1.30)	>	61.28 (1.49)	2.10	-6.750	.000	1.50
Beuger Rechts (Neutral vs. Heiß)	35.52 (2.10)	>	31.72 (1.95)	3.80	-7.265	.000	1.87

N = 70, Wilcoxon-Test.

Tabelle 35

Vergleich der Grand Mean Strecker- und Beuger-Aktivität (μV) Zeitreihe 140ms (70 Werte) vor dem rechten Tastendruck im linken Unterarm zwischen Kälte (8 Grad Celsius) und Neutral (32 Grad Celsius) bei linker Reizung.

Vergleich	μV		Differenz	z	p	<i>Cohens d</i>	
Strecker Links (Kalt vs. Neutral)	39.18 (0.72)	>	36.49 (0.87)	2.69	-7.271	.000	3.36
Beuger Links (Kalt vs. Neutral)	10.93 (0.19)	>	9.73 (0.21)	1.20	-7.271	.000	5.99
Strecker Links (Kalt vs. Heiß)	39.18 (0.72)	>	35.31 (0.61)	3.87	-7.271	.000	5.79
Beuger Links (Kalt vs. Heiß)	10.93 (0.19)	>	9.40 (0.18)	1.53	-7.271	.000	8.26
Strecker Links (Neutral vs. Heiß)	36.49 (0.87)	>	35.31 (0.61)	1.18	-6.458	.000	1.57
Beuger Links (Neutral vs. Heiß)	9.73 (0.21)	>	9.40 (0.18)	0.33	-6.961	.000	1.68

N = 70, Wilcoxon-Test.

Zur Überprüfung der Hypothese, ob unter gleichzeitig rechter Kälteapplikation und Schreibbelastung die muskuläre Aktivität im Agonisten sowie im Antagonisten höher als in allen anderen Bedingungskombinationen während des rechten Tastendrucks ist, wurden

folgende drei Vergleiche aufgestellt. Die ersten 140ms von Strecker und Beuger der Bedingungskombination Kälte/Contra-Qwertz/Reizort Rechts (KCQR) mit 1. Kälte/Contra-QWERTZ/Reizort Links (KCQL), 2. Kälte Pro-QWERTZ/Reizort Rechts (KPQR) und 3. Kälte/Pro-QWERTZ/Reizort Links (KPQL) (Abbildung 44f mit 43c, i, l). Der linke Tastendruck wurde nicht analysiert, da der Pro-QWERTZ-Satz dem regulären Verteilungsmuster (ca. 60% links, 40% rechts) der Buchstaben auf der Tastatur entspricht.

Tabelle 36

Vergleich der rechten Grand Mean Strecker- und Beuger-Aktivität (μV) Zeitreihe 140ms vor dem rechten Tastendruck zwischen den Bedingungskombinationen Kälte/Contra-Qwertz/Reizort Rechts (KCQR) mit Kälte/Contra-QWERTZ/Reizort Links (KCQL), Kälte Pro-QWERTZ/Reizort Rechts (KPQR) und Kälte/Pro-QWERTZ/Reizort Links (KPQL)

Vergleich	μV		Mann Whitney U	Wilcoxon W	z	p	Cohens d
Strecker Rechts (KCQR vs. KCQL)	65.36 (2.25)	> 57.22 (1.96)	23	2508	-10.115	.000	3.85
Beuger Rechts (KCQR vs. KCQL)	34.49 (2.14)	> 29.91 (1.62)	224	2709	-9.277	.000	2.41
Strecker Rechts (KCQR vs. KPQR)	65.36 (2.25)	> 62.34 (2.15)	771	3256	-6.997	.000	1.37
Beuger Rechts (KCQR vs. KPQR)	34.49 (2.14)	< 47.15 (22.31)	1626	4111	-3.434	.001	0.79
Strecker Rechts (KCQR vs. KPQL)	65.36 (2.25)	< 68.87 (8.52)	323	2808	-8.864	.000	0.56
Beuger Rechts (KCQR vs. KPQL)	34.49 (2.14)	> 26.46 (3.22)	36	2521	-10.061	.000	2.93

N=70; df=69; t-Test für unabhängige Stichproben

In allen Vergleichen bewirkt die 8 Grad Celsius/Contra-QWERTZ/Reizung Rechts – Bedingungskombination eine größere EMG- Aktivität, bis auf den Vergleich des rechten Beugers in der Pro-Qwertz bei rechter Reizung (KPQR)- Bedingung und des rechten Streckers in der Pro Qwertz bei linker Reizung (KPQL) – Bedingung.

7.3.5 Ko-Kontraktionen

Zur Berechnung der Ko-Kontraktionen im Pre-Triggerbereich wurde sowohl die im Theorieteil entwickelte Formel 7 (KKI_PAM) verwendet als auch auf die Berechnung der gemeinsamen Fläche (KKI_F) unter Agonist und Antagonist nach Frost et al. (1997) zurückgegriffen (Formeln siehe Abb. 49)

$$\begin{aligned}
 & \text{(a)} \\
 \text{KKI_F(rost)} &= \min(F_E, F_F) \\
 & \text{(b)} \\
 \text{KKI_PAM} &= \frac{1}{7000} * \frac{\min(F_E, F_F)^2}{\max(F_E, F_F) - \min(F_E, F_F)} \\
 & \text{mit} \\
 & F_E = \text{Fläche unter Extensor} \\
 & F_F = \text{Fläche unter Flexor}
 \end{aligned}$$

Abbildung 49: Formeln zur Berechnung der gemeinsamen Fläche von Agonist und Antagonist analog nach (a) Frost et al. (1997) und nach (b) KKI_PAM.

7.3.5.1 Ko- Kontraktionen nach Frost et al.

Die Formel in Abbildung 49 wurde zunächst auf die pro Pb gemittelten ereigniskorrelierten EMG Strecker- und Beuger- Kurven im Pre-Tigger-Bereich in den Bedingungskombinationen angewendet. In Abbildung 50 und 51 sind die gemeinsamen Flächen des rechten Arms (bei Tastendruck rechts) und linken Arms (bei Tastendruck links) dargestellt.

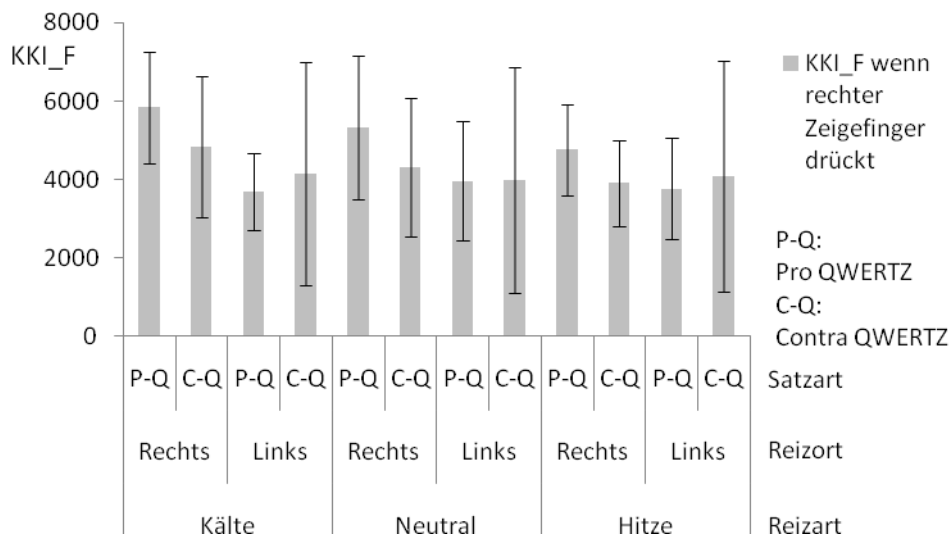


Abbildung 50: Ko-Kontraktionsindex nach Frost et al. (1997) (KKI_F) der rechten Strecker- und Beugermuskulatur in den unterschiedlichen Bedingungskombinationen (je N=6), wenn der rechte Zeigefinger drückt. Contra-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 65.9% aus rechts und 34.1% aus links getippten Tasten besteht; Pro-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 32.5% aus rechts und 67.5% links getippten Tasten besteht; Rechts = Reizung rechte Hand; Links = Reizung linke Hand. Kälte = 8 Grad Celsius, Neutral = 32 Grad Celsius, Hitze = 42 Grad Celsius.

Zur Überprüfung der Hypothesen, ob es unter vorheriger Kälte- oder Hitze- Reizung an der rechten oder linken Hand zu höheren oder niedrigeren Ko-Kontraktionen während eines Tastenanschlages kommt, wurden die KKI_F getrennt in den thermischen Bedingungen gemittelt und via t-Tests für abhängige Stichproben überprüft. In Tabelle 37 sind Vergleiche während des rechten Tastendrucks dargestellt. Es zeigt sich, dass beim rechten Tastendruck eine vorherige 8 Grad Celsius-Reizung zu marginal signifikant höheren Ko-Kontraktionen ($M = 4629.75$, $SD = 1945.98$) im Vergleich zu einer vorherigen 32 Grad Celsius-Reizung ($M = 4394.66$, $SD = 2005.62$) führt. Ko-Kontraktionen nach vorheriger 42 Grad Celsius Reizung ($M = 4126.75$, $SD = 1720.05$) unterscheiden sich jedoch signifikant von der 8 Grad Celsius Reizung ($M = 4629.75$, $SD = 1945.98$).

Tabelle 37

Einfluss und Vergleich von den thermischen Bedingungen Kälte = 8 Grad Celsius, Neutral = 32 Grad Celsius, Hitze = 42 Grad Celsius auf Ko-Kontraktionen der rechten Strecker- und Beuger- Muskulatur beim Tastendruck mit dem rechten Zeigefinger. (Ko-Kontraktionen berechnet nach Frost et al. als gemeinsame Fläche unter den Grand Mean-Kurven von rechtem EMG Strecker und EMG Beuger)

Vergleich	KKI_F		Diff.	t	p	Cohens d	
Kälte – Neutral	4629.75 (1945.98)	>	4394.66 (2005.62)	235.08	1.705	.051	.08
Kälte – Hitze	4629.75 (1945.98)	>	4126.75(1720.05)	502.99	2.971	.004	.20
Hitze – Neutral	4126.75(1720.05)	<	4394.66 (2005.62)	-.267.90	-1.799	.043	.10

N=24; df=23; t-Test für abhängige Stichproben

Zur Berechnung der Ko-Kontraktionen des linken Unterarms (Abbildung 44) wurde analog zum rechten Tastendruck verfahren und die KKI_F getrennt in den thermischen Bedingungen gemittelt und via t-Tests für abhängige Stichproben überprüft (siehe Tab. 38).

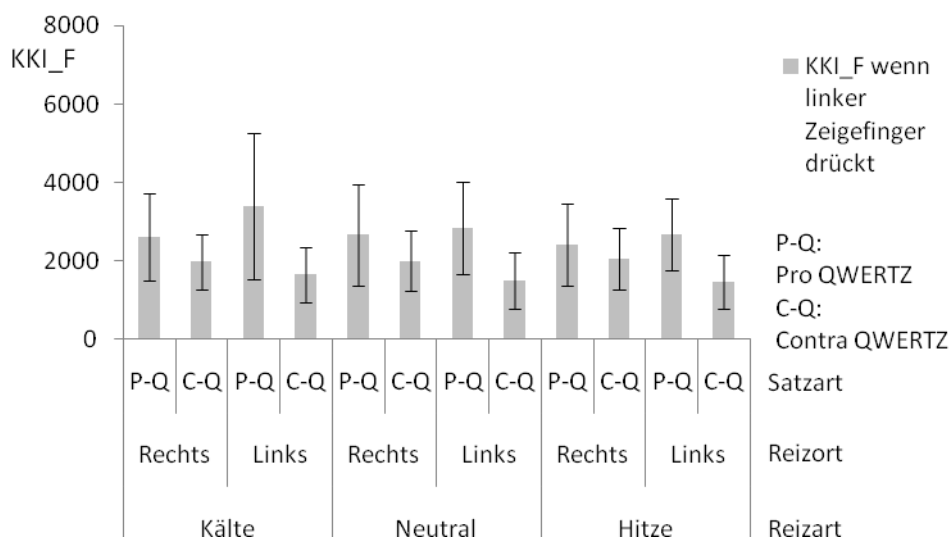


Abbildung 51: Ko-Kontraktionsindex nach Frost et al. (KKI_F) der linken Strecker- und Beugermuskulatur (N=6) in den unterschiedlichen Bedingungskombinationen, wenn der linke Zeigefinger drückt. Contra-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 65.9% aus rechts und 34.1% aus links getippten Tasten besteht; Pro-QWERTZ = zu schreibender Satz, der zu 32.5% aus rechts und 67.5% links getippten Tasten besteht; Rechts = Reizung rechte Hand; Links = Reizung linke Hand. Kälte = 8 Grad Celsius, Neutral = 32 Grad Celsius, Hitze = 42 Grad Celsius.

Beim linken Tastendruck liefert der Vergleich von Kälte ($M = 2409.85$, $SD = 1300.38$) mit Wärme ($M = 2249.78$, $SD = 1100.98$) einen marginal, mit Hitze ($M = 2147.82$, $SD = 932.13$) einen deutlich signifikanten Unterschied.

Tabelle 38

Einfluss und Vergleich der thermischen Bedingungen Kälte, Neutral, Hitze auf Ko-Kontraktionen der linken Strecker- und Beuger- Muskulatur beim Tastendruck mit dem linken Zeigefinger (Ko-Kontraktionen berechnet nach Frost et al. als gemeinsame Fläche unter den Grand Mean Kurven von rechtem EMG Strecker und EMG Beuger).

Vergleich	KKI_F			Diff.	t	p	Cohens d
Kälte – Neutral	2409.85 (1300.38)	>	2249.78 (1100.98)	160.06	1.479	.077	.09
Kälte – Hitze	2409.85 (1300.38)	>	2147.82 (932.13)	262.02	2.085	.024	.16
Hitze – Neutral	2147.82 (932.13)	<	2249.78 (1100.98)	-101.96	-1.754	.046	.07

N=24; df=23; t-Test für abhängige Stichproben

Um zu überprüfen, ob unter gleichzeitiger rechter Kälteapplikation und Schreibbelastung die muskulären Ko-Kontraktionen höher als in allen anderen Bedingungskombinationen sind, wurden beim rechten Tastendruck die Ko-Kontraktionen von Strecker und Beuger der Bedingungskombination Kälte/Contra-Qwertz/Reizort rechts (KCQR) mit Kälte/Contra-QWERTZ/Reizort links (KCQL), Kälte Pro-QWERTZ/Reizort rechts (KPQR) und Kälte/Pro-QWERTZ/Reizort links (KPQL) verglichen. Der linke Tastendruck wurde nicht analysiert, da der Pro-QWERTZ Satz dem regulären Verteilungsmuster (ca. 60% links, 40% rechts) der Buchstaben auf der Tastatur entspricht. Es ergeben sich keine signifikanten Unterschiede.

Tabelle 39

Vergleich der rechten Grand Mean-Ko-Kontraktion berechnet nach Frost et al. als gemeinsame Fläche unter Strecker- und Beuger-Kurven 140ms (70 Werte) vor dem rechten Tastendruck zwischen den Bedingungskombinationen Kälte/Contra-Qwertz/ Reizort rechts (KCQR) mit Kälte/Contra-QWERTZ/ Reizort Links (KCQL), Kälte Pro-QWERTZ/ Reizort rechts (KPQR) und Kälte/Pro-QWERTZ/ Reizort Links (KPQL).

Vergleich	KKI_F			Mann Whitney U	Wilcoxon W	z	p	Cohens d
KKI_F (KCQR vs. KCQL)	4834.17 (1802.25)	>	4152.54 (2837.68)	12	33	-.961	.167	.29
KKI_F (KCQR vs. KPQR)	4834.17 (1802.25)	<	5841.54 (1419.92)	12	33	-.961	.167	.62
KKI_F (KCQR vs. KPQL)	4834.17 (1802.25)	>	3690.84 (979.59)	12	33	-.961	.167	.79

N=12; Mann-Whitney-U-Test

7.3.5.2 Ko-Kontraktionen nach PAM (KKI_PAM)

Zur Berechnung der Ko-Kontraktionen nach dem Pain Adaption Model wurde analog zur Formel von Frost et al. (1997) verfahren. Für die deskriptive Darstellung musste die Tabellenform gewählt werden, da einige Mittelwerte und Standardabweichungen im Verhältnis zu anderen sehr hoch waren. Diese sind für den rechten Tastendruck in Tabelle 40 und den linken Tastendruck in Tabelle 41 für alle Bedingungskombinationen dargestellt.

Zum Vergleich der thermischen Bedingungen wurden t-Tests für abhängige Variablen berechnet (siehe Tabelle 42 und 43). Diese ergaben sowohl für die rechte als auch die linke Seite keine signifikanten Unterschiede.

Tabelle 40

KKI_PAM der rechten Strecker- und Beugermuskulatur (N=6) in den unterschiedlichen Bedingungskombinationen 140ms vor dem rechten Tastendruck: C-Q = zu schreibender Satz, der zu 65.9% aus rechts und 34.1% aus links getippten Tasten besteht; P-Q = zu schreibender Satz, der zu 32.5% aus rechts und 67.5% links getippten Tasten besteht; Rechts = Reizung rechte Hand; Links = Reizung linke Hand; Kälte = 8 Grad Celsius, Neutral = 32 Grad Celsius, Hitze = 42 Grad Celsius.

Art der Reizung	Reizort	Satzart	KKI_PAM M	KKI_PAM SD
Kälte	Rechts	P-Q	1.67	2.01
		C-Q	0.35	0.35
	Links	P-Q	47.06	93.55
		C-Q	0.17	0.09
Neutral	Rechts	P-Q	1.52	1.66
		C-Q	0.29	0.21
	Links	P-Q	2.28	3.41
		C-Q	0.13	0.09
Hitze	Rechts	P-Q	2.33	4.58
		C-Q	0.32	0.30
	Links	P-Q	1.81	2.59
		C-Q	0.12	0.06

Tabelle 41

KKI_PAM der linken Strecker und Beugermuskulatur (N=6) in den unterschiedlichen Bedingungskombinationen 140ms vor dem linken Tastendruck: C-Q = zu schreibender Satz, der zu 65.9% aus rechts und 34.1% aus links getippten Tasten besteht; P-Q = zu schreibender Satz, der zu 32.5% aus rechts und 67.5% links getippten Tasten besteht; Rechts = Reizung rechte Hand; Links = Reizung linke Hand; Kälte = 8 Grad Celsius, Neutral = 32 Grad Celsius, Hitze = 42 Grad Celsius.

Art der Reizung	Reizort	Satzart	KKI_PAM M	KKI_PAM SD
Kälte	Rechts	P-Q	4.25	6.66
		C-Q	13.95	31.73
	Links	P-Q	0.47	0.26
		C-Q	1.57	2.17
Neutral	Rechts	P-Q	4.57	6.06
		C-Q	2.72	5.00
	Links	P-Q	0.71	0.85
		C-Q	1.86	2.65
Hitze	Rechts	P-Q	5.10	8.28
		C-Q	3.26	6.83
	Links	P-Q	0.68	0.82
		C-Q	2.19	3.60

Tabelle 42

Einfluss und Vergleich der thermischen Bedingungen Kälte, Neutral, Hitze auf Ko-Kontraktionen (KKI_PAM) der rechten Strecker- und Beuger- Muskulatur 140ms vor dem rechten Tastendruck.

Vergleich	KKI_PAM			Diff.	t	p	Cohens d
Kälte - Neutral	5.06 (16.09)	>	2.46 (4.14)	2.59	.898	.379	.15
Kälte – Hitze	5.06 (16.09)	>	2.80 (5.54)	2.25	.807	.428	.12
Hitze - Neutral	2.80 (5.54)	>	2.46 (4.14)	0.34	.791	.437	.04

N=24; df=23; t-Test für abhängige Stichproben

Tabelle 43

Einfluss und Vergleich der thermischen Bedingungen Kälte, Neutral, Hitze auf Ko-Kontraktionen (KKI_PAM) der linken Strecker- und Beuger- Muskulatur 140ms vor dem linken Tastendruck.

Vergleich	KKI_PAM			Diff.	t	<i>p</i>	<i>Cohens d</i>
Kälte – Neutral	12.32 (48.21)	>	1.05 (1.99)	11.25	1.162	.124	.23
Kälte – Hitze	12.32 (48.21)	>	1.15 (2.64)	11.16	1.164	.123	.23
Hitze – Neutral	1.15 (2.64)	>	1.05 (1.99)	.09	.203	.420	.01

N=24; df=23; t-Test für abhängige Stichproben

Wie schon bei der Berechnung der Ko-Kontraktionen nach Frost et al. (1997) wurde auch mittels KKI_PAM überprüft, ob unter gleichzeitig rechter Kälteapplikation und Schreibbelastung die muskulären Ko-Kontraktion höher als in allen anderen Bedingungskombinationen sind. Dabei wurden die ersten 140ms des rechten Tastendrucks von Strecker und Beuger in der Bedingungskombination Kälte/Contra-Qwertz/Reizort rechts (KCQR) mit Kälte/Contra-QWERTZ/Reizort links (KCQL), Kälte Pro-QWERTZ/Reizort rechts (KPQR) und Kälte/Pro-QWERTZ/Reizort links (KPQL) verglichen. Der linke Tastendruck wurde nicht analysiert, da der Pro-QWERTZ Satz dem regulären Verteilungsmuster (ca. 60% links, 40% rechts) der Buchstaben auf der Tastatur entspricht. Auch hier resultierten keine signifikanten Ergebnisse, jedoch kann rein deskriptiv die „Contra-Qwertz nach rechter Reizung Bedingung“ als die höchste Ko-Kontraktionen bewirkende Bedingung angesehen werden.

Tabelle 44

Vergleich der rechten Grand Mean-Ko-Kontraktion berechnet nach KKI_PAM 140ms (70 Werte) vor dem rechten Tastendruck zwischen den Bedingungskombinationen Kälte/Contra-Qwertz/Reizort rechts (KCQR) mit Kälte/Contra-QWERTZ/Reizort links (KCQL), Kälte Pro-QWERTZ/Reizort rechts (KPQR) und Kälte/Pro-QWERTZ/Reizort links (KPQL)

Vergleich	KKI_PAM			Mann Whitney U	Wilcoxon W	z	p	Cohens d
KKI_L (KCQR vs. KCQL)	13.95(31.72)	>	1.57 (2.17)	15	36	-.480	.315	.55
KKI_L (KCQR vs. KPQR)	13.95(31.72)	>	4.24 (6.65)	15	36	-.480	.315	.42
KKI_L (KCQR vs. KPQL)	13.95(31.72)	>	0.47 (6.65)	9	30	-1.441	.075	.58

N=12; Mann-Whitney-U-Test

7.3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Analog zur ersten Studie wurde die Alphafehler- Kumulation berücksichtigt und die Justierung des Alphafehlers nach Bonferroni vorgenommen. Diese ist in der folgenden Zusammenfassung der Ergebnisse (siehe Tabelle 45) enthalten. Aufgrund 99 Testungen besteht die Möglichkeit, dass 5 Testungen zufällig signifikant wurden und somit nach Bonferroni ein gerundetes Alpha-Niveau von $.05 / 99 = .001$.

Tabelle 45

Zusammenfassung (Hypothese, Art der Rechnung, Signifikanz mit / ohne Bonferroni-Korrektur und Kommentare) der Ergebnisse der Studie thermische Reizung bei der Tastaturarbeit.

Hypothese	$p < .05$	$p < .001$	Kommentar
EMG des ipsilateralen Agonisten steigt nach Kältereizung während Tastendruck	Ja	Ja	Immer nach ipsilateraler Reizung bei gleichzeitig unabhängiger Tastendruckseite um von 2.64 μ V (links) bis 5.3 μ V (rechts).
EMG des ipsilateralen Agonisten sinkt nach Hitzereizung während Tastendruck	Ja	Ja	Immer nach ipsilateraler Reizung bei gleichzeitig unabhängiger Tastendruckseite um von 0.47 μ V (links) bis 3.8 μ V (rechts).
EMG des ipsilateralen Antagonisten steigt nach Kältereizung während Tastendruck	Ja/Nein	Ja/Nein	Nur beim rechten Tastendruck um 0.47 μ V bei rechter Reizung im rechten Arm.
EMG des ipsilateralen Antagonisten sinkt nach Hitzereizung während Tastendruck	Ja	Ja	Sinkt um von 1.06 μ V (links) bis 2.1 μ V (rechts).
EMG Agonist rechts hat höchste Aktivität, wenn rechts die Kältereizung und die Schreibbelastung zusammenfallen	Ja/Nein	Ja/Nein	Bedingung „wenig Schreibbelastung“ mit rechter Reizung bewirkt höheres EMG als „hohe Schreibbelastung“ mit rechter Reizung.
EMG Antagonist rechts hat höchste Aktivität, wenn rechts die Kältereizung und die Schreibbelastung zusammenfallen	Ja/Nein	Ja/Nein	Bedingung „wenig Schreibbelastung mit linker Reizung“ bewirkt höheres EMG als „hohe Schreibbelastung“ mit rechter Reizung.
Ansteigen der Ko-Kontraktionen nach KKI_F unter Kälte während Tastendruck.	Nein	Nein	Marginal signifikant: ($p = .051$) rechts, ($p = .077$) links
Absinken der Ko-Kontraktionen nach KKI_F unter Hitze während Tastendruck.	Ja	Nein	Im rechten wie linken Unterarm signifikantes Absinken
Ansteigen der Ko-Kontraktionen nach KKI_PAM unter Kälte während Tastendruck.	Nein	Nein	Standardabweichung und Mittelwerte weichen teilweise sehr stark voneinander ab (z. B. M = 0.12 bis 47.06 bei SD von 0.6 bis 96.66)
Absinken der Ko-Kontraktionen nach KKI_PAM unter Hitze während Tastendruck.	Nein	Nein	Siehe oben
Ko-Kontraktionen rechts nach KKI_F sind am höchsten, wenn Kältereizung und die Schreibbelastung zusammenfallen	Nein	Nein	-
Ko-Kontraktionen rechts nach KKI_PAM sind am höchsten, wenn Kältereizung und die Schreibbelastung zusammenfallen	Nein	Nein	Deskriptiv Ja/ Inferenz Nein
Verschlechterung der Befindlichkeit	Nein	Nein	-
Verringerung der Beweglichkeit	Nein	Nein	-
Abnahme der Tastenanschläge	Ja	Nein	
Zunahme der Anschlagsdauer	Ja	Nein	3.54ms (links) und 5.21ms (rechts) mehr Anschläge unter Kälte
Gleichbleiben der Fehler	Nein	Nein	Fehler unterscheiden sich nicht

7.4 Diskussion Experiment 2

Die Studie hatte die Aufgabe zu prüfen, ob die Entstehung muskulärer Ko-Kontraktionen bei ballistischen Fingerbewegungen (Tastschreiben) abhängig von thermischen Bedingungen ist und ob dabei zentral-motorische Parameter wie z. B. die Tastendruckdauer beeinflusst werden. Dabei wurde der Einfluss unterschiedlicher thermischer Reizung bei ipsi- sowie kontralateralem Reizort auf Befinden, Leistung sowie muskuläre Aktivität, Muster und Ko-Kontraktionen beim Zehnfingerschreiben überprüft.

7.4.1 Kontrollvariablen Befindlichkeit und Temperatur

Sind Probanden in einem Experiment aversiven Reizen ausgesetzt, ohne dabei zu wissen, wie belastend diese werden können, besteht zumindest eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass einige Probanden spätestens bei Applikation des Reizes das Experiment verlassen oder sich während der weiteren Untersuchung schlechter fühlen. In dieser Studie ist dies trotz fünfminütiger 8 Grad Celsius Reizung nicht eingetroffen oder die Probandinnen haben ihr wahres Empfinden aus welchen Gründen auch immer für sich behalten. Auch wenn ein Restzweifel bleibt, ist dies für das Gelingen der Operationalisierung von „leichten“ Reizen, die eher belastender als schmerzhafter Natur sind, ein gutes Zeichen.

Die Temperaturen der Fingerspitzen zeigen keine signifikanten Unterschiede von der Warmschreibphase zu der Schreibphase im Experiment, in der vor dem Schreiben 32 Grad Celsius (thermoneutral) warmes Wasser appliziert wurde. Gleichzeitig unterscheidet sich die Fingerspitzentemperatur nach den Schreibphasen zwischen den vorher applizierten Kälte- (8 Grad Celsius) und Hitze- (42 Grad Celsius) Bedingungen signifikant von denen der Warmschreibphase. Die Temperatur der linken Hand reduziert sich von Warmschreibphase zur Kältebedingung um 3.49 Grad Celsius, von Warmschreibphase zur Hitzebedingung steigt sie um 2.18 Grad Celsius. In der rechten Hand reduziert sich die Temperatur von Warmschreibphase zur Kältebedingung um 3.76 Grad Celsius, von Warmschreibphase zur Hitzebedingung steigt sie um 1.41 Grad Celsius. Trotz fünfminütigen Schreibens und der damit aktiven Versorgung und Erwärmung der oberen Extremitäten kann noch ein Hinweis auf eine gelungene Richtung der Operationalisierung gegeben werden, ohne dabei in die Nähe von Schmerz bewirkender Hautoberflächentemperatur (15 Grad Celsius bzw. 45 Grad Celsius) gekommen zu sein (Gavhed, 2003).

Auch wenn die Operationalisierung von „schweren“ oder gar schmerzhaften Reizen klar verneint werden kann, stellt sich die Frage, wie groß die Wirkung der sensomotorischen Inkongruenz bzw. thermischen Reizung war.

7.4.2 Schreibparameter

Die Probandinnen entsprachen mit einem mittleren Fehlerquotienten von $M = 1.53$, $SD = 1.11\%$ bis $M = 1.70$, $SD = 1.35\%$, der sich in den thermischen Bedingungen nicht voneinander unterscheidet, denen, die in der Literatur beschrieben werden (1.0 -3.2% nach Salthouse, 1986). Somit wurde die Qualität des Schreibens durch die ex-afferente Veränderung nicht verändert.

Die Schreibgeschwindigkeit ist unter vorheriger Reizung von 8 Grad Celsius signifikant um 9 Anschläge (3%) reduziert im Vergleich mit der thermoneutralen Bedingung. Dies entspricht der in der Literatur vorfindbaren Annahme einer reduzierten Leistungsfähigkeit unter Kälteeinwirkung (Gavhed, 2003) und ähnelt gleichzeitig der reduzierten Leistung unter kognitiver Belastung (Bowers et al., 1978). Auch wenn die Personen die vorherige Applizierung der 8 Grad Celsius eventuell als schmerzhaft empfunden haben, so zeigen sie keine erhöhte Leistung, wie diese teilweise unter Schmerz beobachtet wurde (Schmidt, 1998). Dies passt sowohl zur Temperatur der Fingerspitzen, die deutlich über 15 Grad liegt (vergleiche Gavhed, 2003) als auch zu der subjektiven Befindlichkeit.

Die nicht schmerzhaft Veränderung des afferenten Inputs durch Kälte bewirkt eine Störung in der Ausführung des motorischen Programms, egal an welcher Seite gereizt wurde. Dabei bewerten sich die Probandinnen nicht als in ihrer Bewegung eingeschränkt. Diese Störung ist somit nicht bewusst. Ein Grund für diese reduzierten Anschläge kann u. a. in der Tastendruckdauer liegen. Diese ist nach vorheriger Kältereizung um 3.54ms links (ca. 8%) und 5.21ms rechts (ca. 5%) länger als nach thermoneutraler Reizung. Aber auch die Interanschlagsintervalle (die Zeit zwischen den Tastenanschlägen) könnten sich verlängert haben, wie bei Zilske (2000) zu beobachten war. Dieser konnte u. a. während kognitiver Belastung eine größere Zunahme der Interanschlagsintervalle im Gegensatz zur Anschlagsdauer beobachten.

Obwohl die Tastendruckdauer als auch die Interanschlagsintervalle stark mit der Reihenfolge des Fingertippens aus kontra- oder ipsilateraler, horizontaler oder vertikaler Richtung variiert (Viviani & Laissard, 1996; Terzuolo & Viviani, 1980), soll im Folgenden die mittlere (ca. 67ms) Anschlagsdauer der N- und B- Taste unter thermoneutraler Reizung exemplarisch für alle angeschlagenen Tasten stehen. Dies würde bei fünfminütigem Schreiben mit 309 Anschlägen pro Minute eine gesamte Tastendruckdauer von etwa 20.7 Sekunden pro Minute ergeben. Somit würden 39.3 Sekunden den Interanschlagsintervallen pro Minute zukommen. Dieses Verhältnis von einem Drittel Anschlagsdauer zu zwei Dritteln Anschlagsintervall entspricht in etwa den Ergebnissen von Zilske (2000). Nach Kältereizung wären dies bei mittlerer Anschlagsdauer von ca. 72ms und 300 Anschlägen pro Minute 21.6 Sekunden gesamte Tastendruckdauer, also fast eine Sekunde mehr Zeit für die Anschlagsdauer und mit 38.4 Sekunden für Interanschlagsintervalle eine Sekunde weniger Zeit zwischen den gedrückt gehaltenen Tasten. Dieser Befund steht im Widerspruch zu den Ergebnissen von Zilske (2000). Nach einer Stunde Tipparbeit wäre dies eine um eine Minute reduzierte Fingerbewegung, bei insgesamt geringerer Schreibleistung und längerem Gedrückthalten der Tasten. Die Kälte, die man nicht als bewegungsbeeinflussend wahrnimmt, reduziert den Bewegungsfluss und zeigt sich durch minimal reduzierte Arbeitsleistung. Die muskuloskeletalen Konsequenzen werden hierbei mit der Beschreibung der elektromyographischen Daten im folgenden Abschnitt diskutiert.

7.4.3 Ereigniskorreliertes EMG

Bei der Betrachtung des muskulären Verlaufs des rechten oder linken Tastendrucks fallen zunächst trotz fehlender Normierung durch % MVC bei etwa gleichem Burstverlauf die unterschiedlichen Niveaus der Muskelpaare auf. Dies zeigt sich trotz großer Altersspanne der Probandinnen und lässt sich am ehesten auf die besser ausgebildete morphologische Struktur der rechten Strecker- und Beugermuskulatur bei Rechtshändern zurückführen. Der Burstverlauf ähnelt dabei dem eines Mausclicks (vergleiche Abbildung 44d und 44f mit Abbildung 29e der ersten Studie). Der Strecker ist aufgrund der haltungsbedingten Pronation beim Tastschreiben stärker aktiv. Der Beuger scheint sich vor dem Tastendruck wie bei einem Katapult aufzuladen und den Finger „abzufeuern“. Wenn der Finger die Taste berührt bzw. herunterdrückt, ist der Beuger längst wieder entspannt. Dies ähnelt sowohl den Ergebnissen von Castellote et al. (2004) in der isometrischen Kontraktionsbedingung (gleichzeitige Aktivierung von Agonist und Antagonist) als auch der „Flex to Target“-Bedingung von

Waters und Strick (1981), in der eine möglichst genaue ballistische Zielbewegung mit dem Zeigefinger ausgeführt werden sollte.

Im muskulären Verlauf des passiven rechten oder linken Arms (Abbildung 45a-l, Abbildung 46a-l) lassen sich ebenfalls Burstvorkommen beobachten. Diese erscheinen jedoch zeitlich später (variiert von 50-140ms nach Beginn der ereigniskorrelierten Aufnahme der drückenden kontralateralen Hand) und können auf Überschneidungen (vgl. Gentner et al., 1988) mit anschließenden Anschlägen der eigentlich „passiven Hand“ auch mit anderen Fingern als dem Zeigefinger zurückgeführt werden.

Die Hitze- und Kältereizung zeigt beim rechten Tastendruck eine möglicherweise von dem sich bewegenden Organ unabhängige Aktivierung der gereizten Seite, da die betreffenden Muskelpaare im Unterschied zur thermoneutralen Bedingung unter Kälte stärker (rechts: Strecker um $0.47\mu\text{V}$ und Beuger um $5.30\mu\text{V}$ erhöht; links: Strecker um $2.69\mu\text{V}$ und Beuger um $1.20\mu\text{V}$ erhöht) aktiviert sind. Dies stimmt mit den Beobachtungen von Oksa et al. (1997) und Rissanen et al. (1996) überein. Gleichzeitig sind die gleichen Muskelpaare unter Hitze weniger stark (rechts: Strecker um $2.10\mu\text{V}$ und Beuger um $3.80\mu\text{V}$ niedriger; links: Strecker um $1.18\mu\text{V}$ und Beuger um $0.33\mu\text{V}$ niedriger) aktiviert (vgl. Tucker et al., 2004), egal ob sie „drücken“ oder nicht (Abbildung 48, rote Buchstaben). Während des linken Tastendrucks ist diese Unabhängigkeit nur beim Beugermuskel zu beobachten (rechts: Beuger um $0.84\mu\text{V}$ unter Kälte erhöht und unter Hitze um $1.27\mu\text{V}$ gesenkt; links: Beuger um $2.64\mu\text{V}$ unter Kälte erhöht und unter Hitze um $0.47\mu\text{V}$ gesenkt).

Da alle Probandinnen den Kriterien einer professionellen Schreibkraft entsprachen und der Großteil der Schreibbelastung beim Maschineschreiben auf der linken Hand liegt, könnte die mit ihr assoziierte rechte Hemisphäre ein „mehr“ an Belastung bzw. afferenter Information durch aktivitätsbedingtes, gelerntes „mehr“ von afferenten Informationen gewöhnt sein. Ein linker Tastendruck wäre somit unstörbarer im Vergleich zu einem rechten Tastendruck. Diese zunächst einfache Überlegung soll unter Berücksichtigung der unterstützenden bzw. stabilisierenden Wirkung des Streckers (Suzuki et al., 2001) durch Bewegungsdämpfung (Milner & Cloutier, 1998), möglichen motorischen Lernens (Osu et al., 1999), der „rivalisierenden Hemisphären“ (Kobayashi et al., 2004) und der ipsilateralen rezeptiven Kälte-Felder (Hensel, 1981) um eine zweite spekulative Überlegung erweitert werden.

Wird die linke Hand vor dem linken Tastendruck mit Kälte gereizt, erfährt auch die linke Gehirnhälfte zusätzliche Information (Hensel, 1981) und aktiviert dadurch die ungereizte rechte Hemisphäre (Kobayashi et al., 2004). Dieser zusätzliche Output der rechten Seite und die somit stärkere Beugeraktivierung im linken Unterarm wäre dann das Ergebnis einer eher „Rivalisierung unterdrückenden“ als kompensatorischen Interhemisphärenaktivierung. Hierbei müsste der linke Antagonist (Strecker) weder eine Stabilisierung (Suzuki et al., 2001) durchführen, noch motorisches Lernen (Osu et al., 1999) aufgrund des neuartigen sensorischen Zustandes unterstützen. Er verändert sich somit nicht. Bei rechter Reizung würde dies zusätzliche Information in der rechten Hemisphäre bedeuten. Da diese jedoch gelernt hat mehr zu arbeiten und damit auch mehr afferente Signale verarbeiten zu können, ist größere Unterstützung oder „Umlernen“ der Bewegungsausführung durch den linken Strecker ebenfalls nicht notwendig. Gleichzeitig wird aber wieder die linke Hemisphäre rivalisierend aktiv und erhöht somit die rechte Beugeraktivität.

Die rechte Hand arbeitet beim 10-Finger-Tastschreiben gewöhnlich weniger (ca.40% der Tippelistung bei QWERTZ-Tastatur in deutscher Sprache). Ihre Bewegung ist dabei störbare als die der linken Hand. Dies äußert sich, ohne Berücksichtigung der Schreibbelastung, der Literatur entsprechend bei Kälte durch höhere Aktivität der Muskeln (Oksa et al., 1997; Rissanen et al., 1996) und bei Hitze durch niedrigere Aktivität der Muskeln (Tucker et al., 2004) an der gereizten Seite. Bei linker Reizung erfährt auch die linke Hemisphäre zusätzliche Information, welche sie nicht erwartet. Da in der linken Hemisphäre bei rechtshändigen Personen zu 95% die Sprachverarbeitung lokalisiert ist (Rasmussen & Milner, 1977), kann neuer afferenter Input (Kälte) von der linken Hand kommend störend wirken. Dies könnte wiederum zu einem „Update“ der Efferenz, also zu einem „Umlernen“ des motorischen Programms führen und somit die muskuläre Aktivität von Strecker und Beuger im rechten Unterarm erhöhen. Der Kälteeinfluss der rechten Hand reizt auch die rechte Hemisphäre. Somit wird die Rivalisierung zur linken Hemisphäre unterdrückt, was sich ebenfalls in einer erhöhten muskulären Aktivität des rechten Unterarms auswirkt. Dieser bisherige zweite Erklärungsversuch beinhaltet noch nicht die summierte Belastung aus Reizort und größerer Schreibbelastung, die bei Berücksichtigung besondere Überlegungen erfordert.

Bei Betrachtung der summierten Belastung (rechts größere Schreibbelastung und Reizung) fallen zwei Besonderheiten auf. 1. Es resultiert eine höhere EMG-Aktivität im

rechten Beuger, wenn die Schreibbelastung links grösser ist, die Reizung durch Kälte jedoch rechts erfolgt. 2. Es resultiert eine höhere EMG-Aktivität im rechten Strecker, wenn die Schreibbelastung rechts grösser ist, die Reizung jedoch links erfolgt. Zur Klärung dieses Phänomens sind ebenfalls die unterstützende bzw. stabilisierende Wirkung des Streckers (Suzuki et al., 2001) durch Bewegungsdämpfung (Milner & Cloutier, 1998), mögliches motorisches Lernen (Osu et al., 1999), die „rivalisierenden Hemisphären“ (Kobayashi et al., 2004) und die ipsilaterale Kälteverarbeitung (Hensel, 1981) zu berücksichtigen.

Zu 1.: Bei rechter Reizung erfährt die rechte Hemisphäre zusätzliche Information, welche sie nicht erwartet. Der rechte motorische Kortex ist aber u. a. für die linke muskuläre Aktivität verantwortlich. Der doppelte Anspruch an die rechte Hemisphäre durch größere Schreibbelastung links und Kältereizung rechts könnte eine Hemmung verursachen, die die Interhemisphärenhemmung zur linken Hemisphäre unterdrückt und diese (in diesem Fall nur einfach belastet durch die Sprachverarbeitung) ausnutzt, um mehr Output für den rechten Agonisten zu generieren. Auch hier wäre dies ein eher „Rivalisierungs-hemmender“ als kompensatorischer Effekt. Dafür würde auch die rechte Streckeraktivität sprechen, die als „Unterstützung“, „Kontrolle“, „Lernen unter neuen Bedingungen“ nur bei doppelter Belastung durch gleichzeitige Reizung rechts und Schreibbelastung rechts eine höhere Aktivität zeigt. In diesem Fall läge die Anforderung einer höheren motorischen Aktivierung auf der linken Seite bei der Sprachverarbeitung, während der zusätzliche Input auf der rechten Seite verarbeitet würde. Eine Synchronisation zwischen den Hemisphären könnte hier schwieriger sein und demnach einen Lernprozess erfordern, der eine erhöhte rechte Streckeraktivität zur Folge hat.

Zu 2.: Bei linker Reizung erfährt die linke Hemisphäre zusätzliche Information zur Rückmeldung der intendierten Bewegung. Da in der linken Hemisphäre bei rechtshändigen Personen zu 95% die Sprachverarbeitung lokalisiert ist (Rasmussen & Milner, 1977), kann diese nun durch größere Schreibbelastung der rechten Hand sowie neuen von der linken Hand kommenden afferenten Input (Kälte) gestört werden. Dies führt wiederum zu einem „Update“ der Efferenz, also zu einem „Umlernen“ bzw. „Stabilisieren“ und somit zu einer erhöhten antagonistischen (Strecker-) Aktivität. Dabei äußert sich das Umlernen bzw. die Störung der Bewegungsausführung auch in einer reduzierten Aktivität des rechten Agonisten (Beuger), für die auch weniger Zeit verwendet wird (siehe oben).

Die bisherigen Annahmen zu den Ergebnissen der Muskelaktivierung sind sehr vereinfacht und spekulativ und können nur durch weitere Studien und weiterführende Methoden genauer analysiert werden. Erst dann lässt sich klären, ob sich bei minimaler peripherer Reizung während hoch automatisierter Bewegungen rivalisierende Hemisphären-Effekte durch z. B. fMRI-Aufnahmen nachweisen lassen.

Thermische Reizungen durch Kälte oder Hitze an der rechten oder linken Hand bewirken muskuläre Effekte (Veränderung der Strecker- und Beugeraktivität) abhängig von der sich bewegenden Seite. Da am PC-Arbeitsplatz meist mit der dominierenden Hand auch noch eine PC-Maus bedient wird, könnte dies je nach Belastungs- und Bewegungsgrad die Wahrscheinlichkeit einer späteren Schmerzchronifizierung für eine bestimmte Seite erhöhen und das, obwohl die afferente Veränderung nicht subjektiv bemerkt wird, sondern nur durch veränderte Schreibparameter beobachtbar ist.

7.4.4 Ko-Kontraktionen

Die muskulären Ko-Kontraktionen von Beuger und Strecker bzw. Agonist und Antagonist wurden wie in Studie 1 als gemeinsame Fläche des gleichgerichteten EMGs zweier Muskeln (Frost et al., 1997; Unnithan et al., 1996) sowie als linear transformiertes ($\cdot 1/7000$) Produkt aus der Relation von gemeinsamer Fläche zu der Differenz beider Flächen mit der gemeinsamen Fläche (KKI_PAM) bestimmt.

Muskuläre Ko-Kontraktionen sind unter Verwendung der Formel nach Frost et al. (1997) unter Kälte marginal signifikant höher und unter Hitze signifikant reduziert. Unter Verwendung der Formel nach KKI_PAM können keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Dies kann daran liegen, dass die Standardabweichungen der Bedingungskombinationen zum Teil sehr viel höher als die Mittelwerte sind. Lediglich deskriptiv lassen sich im Mittel größere Ko-Kontraktion unter Kälte und niedrigere Ko-Kontraktionen unter Hitze beobachten. Die daraus möglichen Konsequenzen sollen am Ende dieser Arbeit genauer diskutiert werden (siehe Modelldiskussion).

Nach vorheriger Kältereizung steigt die Beugeraktivität während eines Tastendrucks stärker (rechts um $5.30\mu\text{V}$, links um $2.64\mu\text{V}$) an als die Streckeraktivität (rechts um $0.47\mu\text{V}$, links keine Veränderung). Dabei ist beim rechten Tastendruck ein höheres Niveau der

Muskelpaare und eine gleichzeitig größere Zunahme der Ko-Kontraktionen im Vergleich zum linken Tastendruck zu beobachten. Unter Kälte ist somit die Zunahme der Ko-Kontraktionen hauptsächlich durch das Anwachsen der agonistischen Tätigkeit bestimmt. Unter Hitze reduziert sich das Niveau bei beiden Muskelpaare (im linken Strecker um $1.06\mu\text{V}$, im linken Beuger um $0.47\mu\text{V}$; im rechten Strecker $2.10\mu\text{V}$ und rechten Beuger um $3.80\mu\text{V}$). Dabei steigt rechts die Differenz der Muskelpaare von $27.86\mu\text{V}$ in thermoneutraler Bedingung auf $29.56\mu\text{V}$ unter Hitze, während sie links von $18.65\mu\text{V}$ in thermoneutraler Bedingung auf $18.06\mu\text{V}$ unter Hitze abnimmt. Das Nachlassen der Ko-Kontraktionen ist somit im rechten Muskelpaar gewichtiger, da dort sowohl das Niveau geringer wird als auch die Differenz zwischen den beiden Muskeln zunimmt. Im linken Muskelpaar nimmt das Niveau ab, jedoch nähern sich die Muskeln minimal an, d. h. das Verhältnis zwischen ihnen bleibt gleich im Vergleich zum rechten Tastendruck. Die Wirkungsweise des zusätzlichen thermischen afferenten Inputs auf Zunahme und Abnahme von muskulären Ko-Kontraktionen hat bei rechtshändigen professionellen Schreibkräften stärkere Konsequenzen in der rechten Unterarmmuskulatur.

Wie in den Hypothesen angenommen ist unter Kälte eine quantitative Zunahme von Ko-Kontraktionen zu verzeichnen, die als eine erste Bestätigung des Modells von Lund innerhalb des Arbeitsmodells angesehen werden kann. Bei genauerer Betrachtung sind unter zusätzlichem afferentem Input jedoch andere Phänomene beobachtbar. Ähnlich wie in der ersten Studie während der Mausarbeit steigt der Agonist an. Dabei erscheint die rechte Seite störrischer als die linke, da dort auch der Strecker an Aktivität zunimmt. Dies widerspricht den Beobachtungen von Lund et al. (1991), ähnelt jedoch denen von Oksa et al. (2002), die ein Ansteigen beider Muskeln beobachten konnten. Zwei neue Befunde stellen jedoch der mögliche „Laterale Ko-Kontraktions-Effekt“ und die aktive Reduzierung der Ko-Kontraktionen unter vorheriger 42°C Reizung dar. Erstere wäre mit der bereits beschriebenen leichteren muskulären Störrigkeit des rechten Tastendrucks erklärbar. Die signifikante Reduktion der Muskelniveaus unter zusätzlicher vorheriger Hitzereizung kann als Entlastung des muskuloskeletalen Apparates mit gleichzeitig einhergehender erhöhter Tastendruckdauer bei gleicher Anschlagsleistung beschrieben werden.

Die Unterschiede von summierter Belastung (rechts Reizung und Schreibbelastung am größten) zu anderen Bedingungskombinationen liefern keine signifikanten Ergebnisse. Dies kann zum einen an der hohen Standardabweichung liegen, aber auch durch die

Empfindlichkeit der Formel nach KKI_PAM bedingt sein. Für weitere Studien ist zu überlegen, ob durch ein Design mit (gebündelten) Zeitreihen (siehe Studie 1) bessere Varianzreduktion möglich ist, ohne auf normierte Werte (%MVC) zurückzugreifen zu müssen.

Durch Kälte (8 Grad Celsius)- bzw. Hitze (42 Grad Celsius)- Reizung erzeugte sensorische Inkongruenz kann muskuläre Ko-Kontraktionen erhöhen (durch Aktivierung der Beugermuskulatur) bzw. senken. Kälte wirkt dabei auf Schreibparameter wie Anschlagsdauer und Anschlagsrate und somit stärker auf die Performanz (Ghaved, 2003), während Hitze nur auf die Anschlagsdauer zu wirken scheint. Beim rechten Tastendruck bewirkt die thermische Reizung (rechts oder links) unabhängig vom sich bewegenden Organ eine Veränderung der muskulären Aktivität (gemäß den in der Literatur vorhandenen Ergebnissen) im Strecker und Beuger des gereizten Organs. Beim linken Tastendruck trifft dies nur auf die Beugermuskulatur zu.

8. Diskussion des Arbeitsmodells

Die Aufgabe dieser Arbeit war es sensomotorische Inkongruenz als hypothetische Belastungskomponente am PC- Arbeitsplatz zu untersuchen. Dabei sollte überprüft werden, ob unter sensomotorischer Inkongruenz (heuristisches Inkongruenzmodell nach Fink et al., 1999; Blakemore et al., 2000; McCabe et al., 2005; Sorgatz, 2005), wie z. B. bei Schreckreaktionen, (Valls-Sole, Kumru & Kofler, 2008; Nieuwenhuijzen et al., 2000) dieselben muskulären Ko-Kontraktionen zu beobachten sind wie unter der Aufrechterhaltung von möglicherweise dysfunktionalen Ko-Kontraktionen (Pain Adaption Model/PAM nach Lund et al., 1991). Ein Arbeitsmodell bestehend aus dem PAM und dem heuristischen Inkongruenzmodell war erforderlich, um zwei zentrale Fragen zu beantworten:

1. Können bei hochgradig überlernten Bewegungen an Pointing Devices (PC-Maus und –Stift) muskuläre Ko-Kontraktionen durch eine Störung der Augen-Hand Koordination (verzögerte visuelle Rückmeldung) ausgelöst werden und sind diese auch im passiven Bewegungsorgan beobachtbar (bilateraler Transfer)?
2. Ist die Entstehung muskulärer Ko-Kontraktionen bei ballistischen Fingerbewegungen (Tastschreiben) abhängig von thermischen Bedingungen und werden dabei zentral-motorische Parameter wie z. B. die Tastendruckdauer beeinflusst?

Eine Zunahme von Ko-Kontraktionen tritt in beiden Studien durch Anwachsen der agonistischen Aktivität sowohl durch Kälte beim Tastschreiben als auch durch visuelle Verzögerung bei der Mausearbeit auf. Auch Transfer-Effekte auf das passive Bewegungsorgan sind zu beobachten.

8.1 Sensorische Inkongruenz durch visuelle Verzögerung vs. Kältereizung

Bei visuell verzögerter Mausearbeit (Abbildung 52b) und beim Tastschreiben unter Kälte (Abbildung 53a) ist ein Ansteigen der agonistischen Aktivität zu verzeichnen. Gleichzeitig bewirken die visuell verzögerte Stiftarbeit (Abbildung 52a) und das Tastschreiben unter vorheriger Hitzereizung (Abbildung 53b) eine Abnahme der Ko-Kontraktionen auf ipsilateraler Seite. Kontralaterale Transfer-Effekte sind bei der Stiftarbeit zu beobachten, da visuell verzögerte Stiftarbeit ein Ansteigen der muskulären Aktivität auf der kontralateralen Seite zur Folge hat. Auch beim Tastschreiben treten laterale Effekte auf, diese jedoch in eher dispositioneller oder „händigkeitspezifischer“ Form. Die Aktivierung der

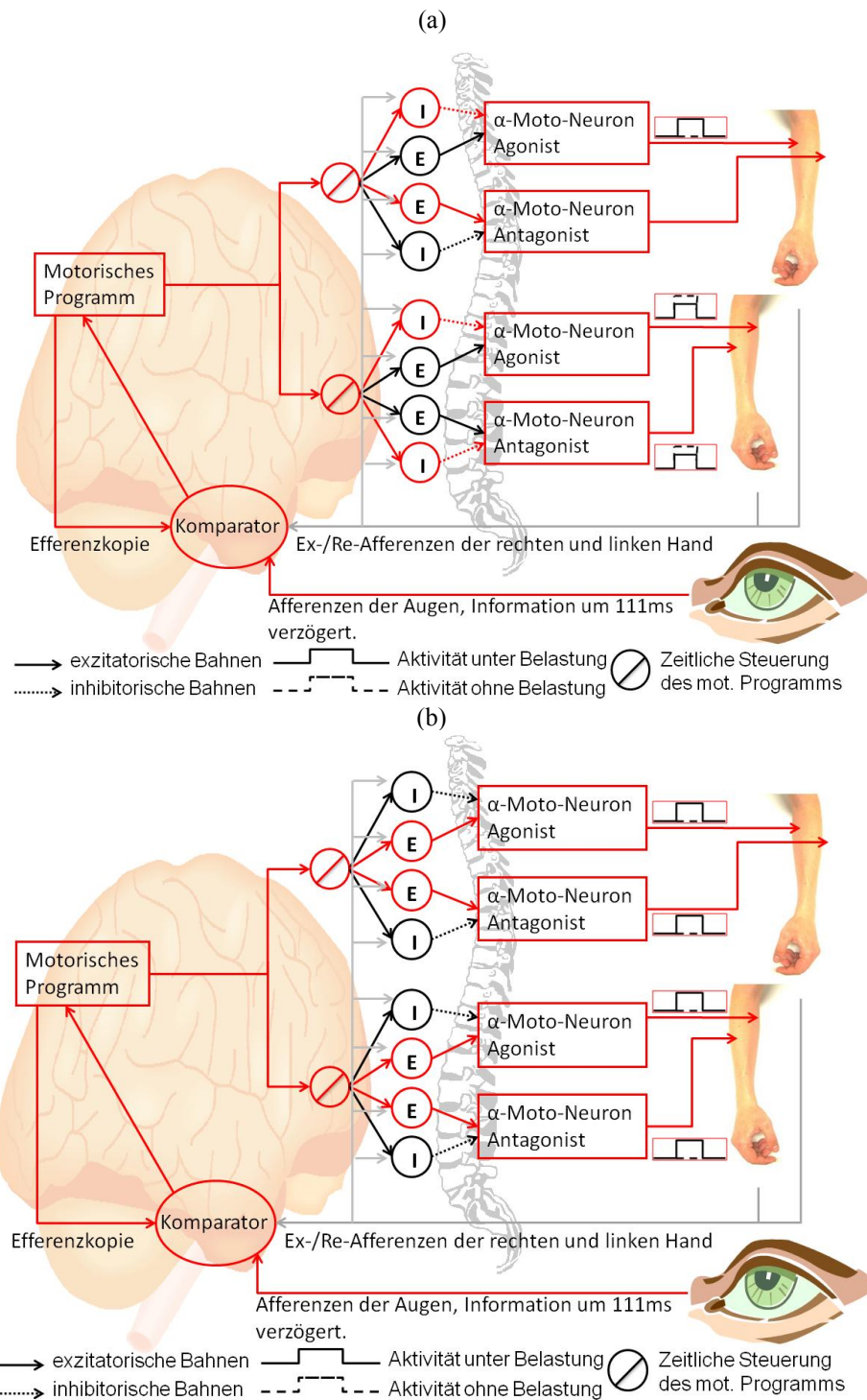


Abbildung 52 a, b. Arbeitsmodell mit Ergebnisbeschreibung der Studie 1. Stiftarbeit (a) und Mausearbeit (b) bei visueller Verzögerung (rote Pfeile). Diese hat bei der Stiftarbeit eine aktivierende Wirkung im kontralateralen und inhibitorische Wirkung im ipsilateralen (sich bewegenden) Arm. Bei der Mausearbeit kommt es zu einer aktivierenden Wirkung im kontralateralen und ipsilateralen (sich bewegenden) Arm.

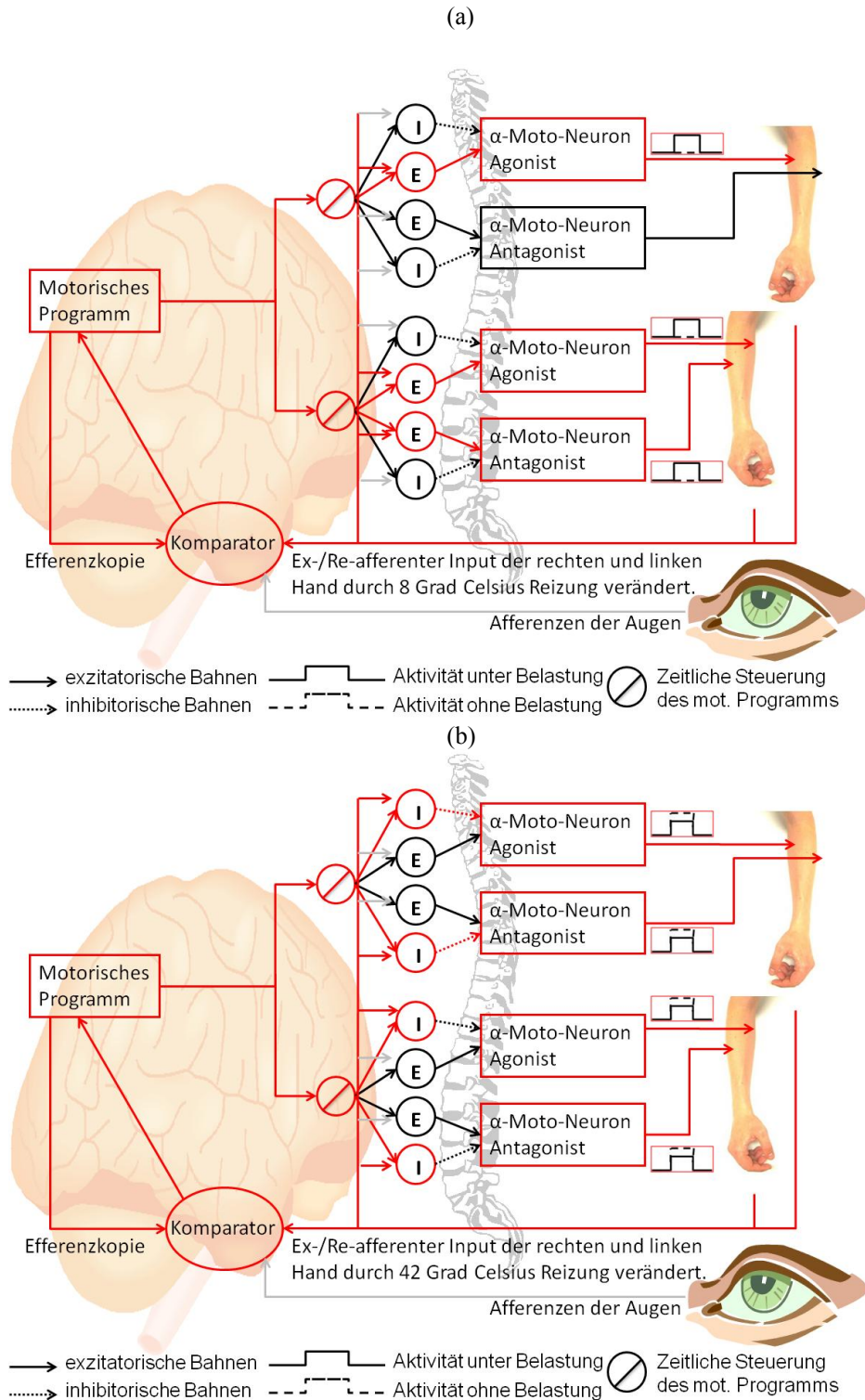


Abbildung 53 a, b. Arbeitsmodell mit Ergebnisbeschreibung der Studie 2 . Tastschreiben nach zusätzlicher (rote Pfeile) Kältereizung (a) oder (rote Pfeile) Hitzereizung (b) bei der Tastaturarbeit. Kälte und Hitze hat im Beuger aktivierende Wirkung im gereizten Arm unabhängig von Bewegung. Der Antagonist ist bei Kälte nur im linken Arm betroffen.

rechten Strecker- und Beugermuskeln durch Kältereizung beim Tastschreiben ist eher veränderbar oder störbare als die Aktivierung der Strecker- und Beugermuskeln der linken Hand. Sensomotorische Inkongruenz durch thermische Reizung oder inkongruente Information zweier Wahrnehmungskanäle bei der PC-Arbeit hat somit unterschiedliche motorische Auswirkungen.

Die bisherige Evidenz zur Wirkungsweise sensorischer Inkongruenz (McCabe et al., 2005; Blakemore et al., 2000; Fink et al., 1999) kann mit dieser Arbeit um Veränderungen in der muskulären Aktivität bei der PC-Arbeit erweitert werden. Die muskulären Effekte scheinen in Abhängigkeit des (überlernten) motorischen Programmes und des damit verbundenen unterschiedlichen afferenten Inputs aufzutreten. Dabei sind zentral- motorische Parameter wie Tastendruckdauer und Anschläge pro Minute ebenfalls verändert. Die zeitliche Stabilität der Bewegungseinheiten (Carter & Shapiro, 1984; Robertson & Halverson, 1988) kann durch thermische Reize moduliert werden, wie die längere Tastendruckdauer in der Studie 2 zeigt (vgl. Zilske, 2000).

Die Inkongruenz wirkt auf muskuläre Aktivität während der Bewegung reizspezifisch und äußert sich ähnlich wie bei Angst (vgl. Furcht: Bradykardie vs. Tachykardie) in unterschiedlicher Aktivierungsrichtung (Karnath & Thier, 2003). Eine Erweiterung des Arbeitsmodells um eine hypothetische Spezifikations-Komponente (SK) erscheint angebracht. Diese steht im direkten Austausch mit dem Komparator und den sensorischen Arealen. Während der Komparator das Ergebnis eines Vergleichsprozesses weiterleitet, moduliert die Spezifikations-Komponente ipsi- sowie kontralaterale als auch reizspezifische Anteile der Information (Abbildung 54).

8.2 Ko-Kontraktionen und Formel

Das Modell von Lund et al. (1991) beschreibt bei lokalen Schmerzen (z. B. im rechten Unterarm) eine über Interneurone verschaltete Inhibition des Agonisten und Exzitation des Antagonisten. Diese Form von Ko-Kontraktionen, die möglicherweise dysfunktional die Aufrechthaltung von Schmerzen begleiten, konnte bei sensorischer Inkongruenz nicht beobachtet werden. Letztere ist je nach Reizmodalität, durch eine Zunahme von Ko-Kontraktionen durch Ansteigen des Agonisten und ein geringeres Ansteigen des Antagonisten

gekennzeichnet. Desweiteren konnten in den Kontrollbedingungen Ko-Kontraktionen

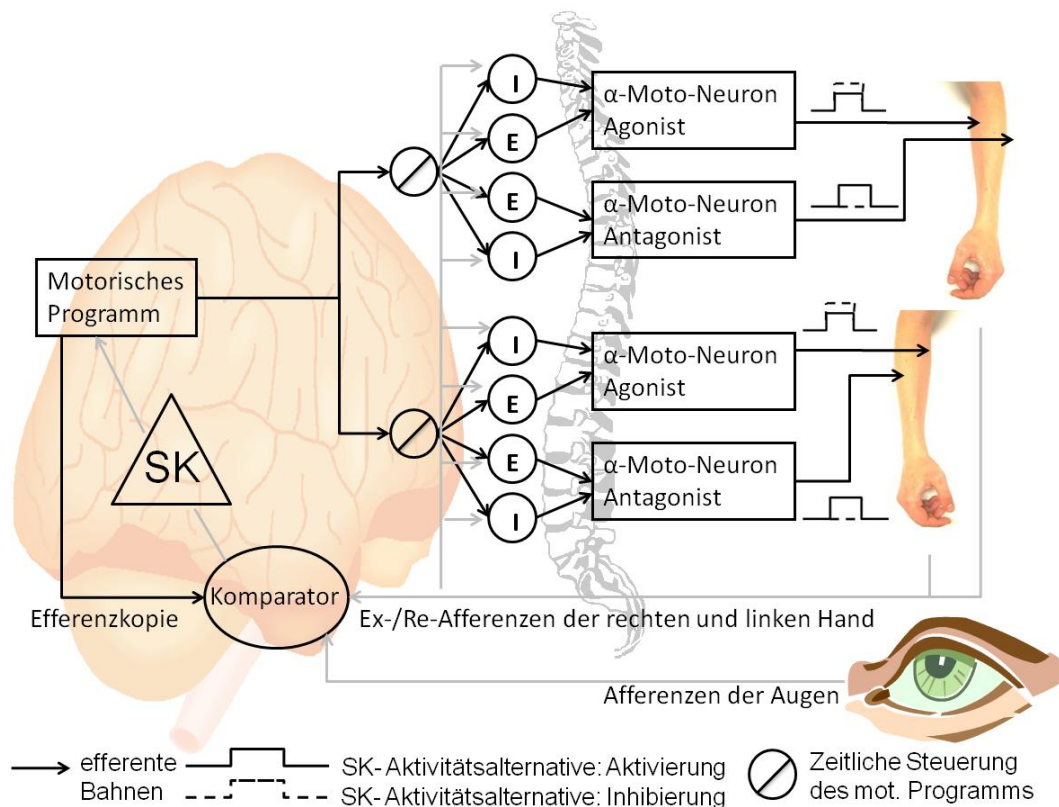


Abbildung 54 a,b. Das um eine hypothetische Spezifikations- Komponente erweiterte Arbeitsmodell nach Fink et al. (1999), Blakemore et al. (2000), McCabe et al. (2005) und Sorgatz (2005) mit inhibitorischen und exitatorischen Interneuronen im Rückenmark. Diese werden nach Modulation der Vergleichsinformation aus dem Komparator und Update des motorischen Programms spezifisch aktiviert.

(vgl. Katapult) auch bei einem Tastendruck (Tastatur und Maus) ohne Belastung beobachtet werden. Dieses Resultat gibt neue Impulse zur Berechnung und Einschätzung von muskulären Ko-Kontraktionen. Da haltungsbedingt die Streckermuskulatur am PC-Arbeitsplatz konstant aktiviert ist, stellt sich die Frage, wie viel Aktivität die Beugermuskulatur aufbringen muss, um Mikroverletzungen (LaStayo et al., 2003) im Gegenspieler (Strecker) zu bewirken (Abbildung 55a, b) und später zu kumulieren (Sorgatz, 2002).

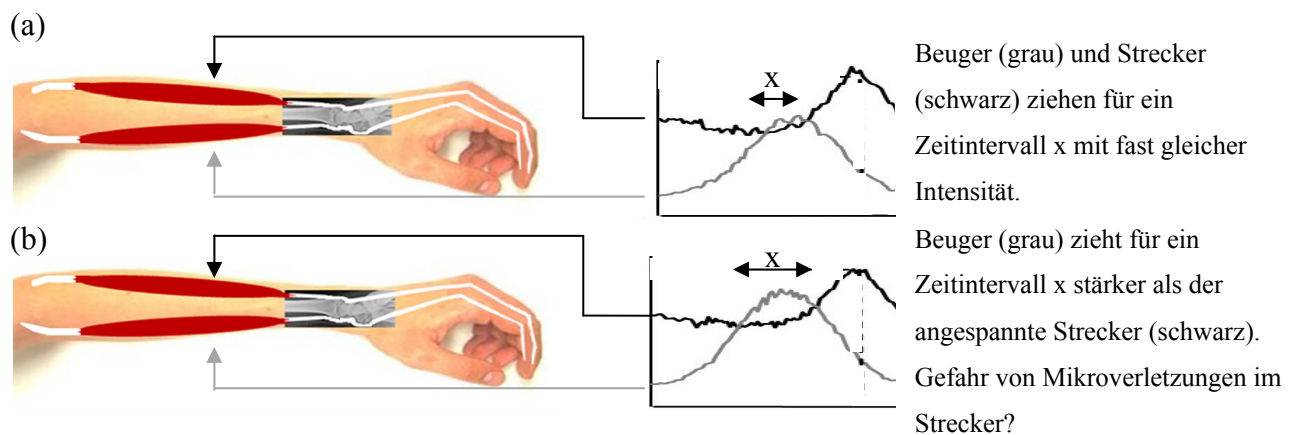


Abbildung 55a, b. Ko-Kontraktionen der Strecker- (schwarze Linie) und Beugermuskulatur (graue Linie) bei Maus und Keyboard-Tastenanschlag. Bei (a) ist kurzfristig gleichstarke Aktivierung zu verzeichnen. Unter (b) ist der Beuger kurzfristig stärker aktiviert.

Auch sollte zur Bewertung der möglichen Gefahr von Mikroverletzungen die Berechnung von Ko-Kontraktionen überdacht werden. Ein neuer Index könnte im ereigniskorrelierten EMG einen Schwellenwert angeben, der aufzeigt, um welchen Betrag die Streckeraktivität bereits überschritten wurde. Weitere Studien könnten mittels Gewichten die exzentrische Dehnung aktivierter Muskel bei gleichzeitiger Messung der muskulären Aktivierung bewirken. Anschließende histologische Verfahren könnten Muskelbiopsien auf mögliche Faserrisse untersuchen.

Es ist darüberhinaus zu überlegen, wie sich die nach dem PAM gestaltete Formel weiter verbessern lässt. Dies könnte durch Einfügen von Konstanten geschehen, die eine Abschwächung des plötzlichen Anstiegs im Bereich nahe der Nulldifferenz zwischen den Muskeln (siehe Abbildung 10) bewirken. Dies würde Ausreißerwerte, welche u. a. in der zweiten Studie zu beobachten sind, verhindern.

8.3 Fazit und offene Fragen

Neben Belastung durch thermische Manipulation (Oksa et al., 2006), Aufgabenveränderung (Szeto et al., 2005) und Stressinduzierung (Van Galen et al., 2002) kann auch sensomotorisch inkongruente Information den muskuloskeletalen Apparat beanspruchen. Nach dem Konzept von Belastung, Beanspruchung und Adaption (Laube, 2004) stellt sich in einem weiteren Schritt die Frage, wie lange andauernd und wie stark

senomotorische Inkongruenz sein muss, um zu einer möglichen Veränderung der muskulären Kontraktionsrichtung nach PAM zu gelangen. Diese Form der Adaption kann sich auch in einer dauerhaften Veränderung der motorischen Aktivität (Haltung etc.) äußern (Kleinböhl et al., 2005). In weiteren Studien sollte deshalb überprüft werden, ob und wie minimale zusätzliche Reizungen durch neuroplastische Vorgänge markiert werden können und ob diese auch bei späterem Ausbleiben der minimalen zusätzlichen Reizungen Veränderungen in behavioralen Parametern bewirken (analog zu Sorgatz, 2005).

Zur Untersuchung der Spezifikations-Komponente (SK) (bzw. die ipsi-sowie kontralateralen und reizspezifischen Informationen modulierende Einheit) wären Experimente auf dem Design von Kobayashi et al. (2004) aufbauend vorstellbar. Unterschiedliche, an Komplexität zunehmende Bewegungen mit der rechten oder linken Hand könnten bei sensorischer Veränderung, neben thermischer Reizung auch durch Vibration appliziert, bzw. mechanischer Reizung untersucht und die Auswirkungen im ereigniskorrelierten EMG beobachtet werden. Weiter sollte überprüft werden, ob sich auch durch haptische Verzögerung (siehe Jay, Glencross & Hubbard, 2007) lateraler Transfer von muskulärer Aktivierung beobachten lässt.

Zukünftige Studien sollten u. a. auch RSI-Patienten miteinbeziehen. Dabei könnte die Überprüfung ihrer muskulären Aktivität mittels ereigniskorreliertem EMG erkennen lassen, ob sich diese ohne Veränderung der Afferenzen entsprechend dem Modell von Lund et al. (1991) verhalten (als Erweiterung zu Birch et al., 2000). Anschließend wäre zu überlegen, welche Faktoren eine mögliche spätere Schmerzadaption und eine Änderung der Kontraktionsrichtung begünstigen (s. o.). Dabei könnte ein mögliches Bindeglied zwischen Beanspruchung und Adaption gefunden werden, um letztendlich neue Impulse zur Entwicklung präventiver Maßnahmen gegen Schmerzchronifizierung am PC-Arbeitsplatz zu ermöglichen.

9. Literaturverzeichnis

- Adams, J.A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of motor behavior*, 3, 111-150.
- Ait-Haddou, R., Binding, P. & Herzog, W. (2000). Theoretical considerations on cocontraction of sets of agonistic and antagonistic muscles. *Journal of biomechanics*, 33, 1105-1111.
- Amell, T.K. & Kumar, S. (2000). Cumulative trauma disorders and keyboarding work. *International journal of industrial ergonomics*, 25 (1), 69-78.
- Andersen, J.H., Thomsen, J.F., Overgaard, E., Lassen, C.F., Brandt, L.P., Vilstrup, I. et al. (2003). Computer use and carpal tunnel syndrome: a 1-year follow-up study. *The Journal of the American Medical Association*, 289 (22), 2963-2969.
- Baker, N.A. & Cidboy, E.L. (2006). The effect of three alternative keyboard designs on forearm pronation, wrist extension, and ulnar deviation: A meta-analysis. *American Journal of Occupational Therapy*, 60 (1), 40-49.
- Barr, A.E., Barbe, M.F. & Clarke, B.D. (2004). Work-related musculoskeletal disorders of the hand and wrist: Epidemiology, pathophysiology, and sensorimotor changes. *Journal of orthopaedic & sports physical therapy*, 34 (10), 610-627.
- Bernstein, N. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. New York: Pergamon Press.
- Beschoner, P. (2006). *Die Bedeutung fehlerhafter Antworten auf die Fehlerverarbeitung bei Patienten mit einer schweren Depression: eine Studie mit ereigniskorrelierten Potentialen*. Unveröffentlichte Dissertation, Medizinische Fakultät, Universität Ulm.
- Best, K.H. (2005). Zur Häufigkeit von Buchstaben, Leerzeichen und anderen Schriftzeichen in deutschen Texten. *Glottometrics*, 11, 9-31.
- Biran, A. & Breiner, M. (1999). *Matlab 5 für Ingenieure. Systematische und praktische Einführung*. Bonn: Addison-Wesley.

- Birch, L., Graven-Nielsen, T., Christensen, H. & Arendt-Nielsen, L. (2000). Experimental muscle pain modulates muscle activity and work performance differently during high and low precision use of a computer mouse. *European journal of applied physiology*, 83 (6), 492-498.
- Blakemore S.J., Wolpert D., Frith, C. (2000). Why can't you tickle yourself. *Neuroreport*, 11 (3), 11-15.
- Blaszczyk, J.W. (2003). Startle response to short acoustic stimuli in rats. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 63, 25-30.
- Bobbert, M.F., Huijing, P.A. & Ingen Schenau, G. J. van (1987). Drop jumping. I & II. The influence of dropping height on the biomechanics of drop jumping. *Medicine and science in sports and exercise*, 19 (4), 332-346.
- Bosco, C. & Viitasalo, J.T. (1982). Potentiation of myoelectrical activity of human muscles in vertical jumps. *Electromyography and clinical neurophysiology*, 22 (7), 549-562.
- Bowers, D., Heilman, K.M., Satz, P. & Altman, A. (1978). Simultaneous performance on verbal, nonverbal and motor tasks by right-handed adults. *Cortex; a journal devoted to the study of nervous system and behavior*, 14 (4), 540-556.
- Bowsher, K., Damiano, D. & Vaughan, C. (1992). Joint torques and co-contraction during gait for normal and cerebral palsy children. In: *Proceedings of Second North American Congress on Biomechanics*, 319-320
- Boyle, M. & Canter, G. J. (1987). Neuropsychological analysis of a typewriting disturbance following cerebral damage. *Brain and language*, 30 (1), 147-164.
- Bureau of Labor Statistics (1997). *Work injuries and illnesses by selected characteristics*. Washington DC: U.S. Department of Labor, Bureau of Labor Statistics.
- Bureau of Labor Statistics News (2001). *Lost-Worktime Injuries and Illnesses: Characteristics and Resulting Days Away From Work*. Washington DC: U.S. Department of Labor. <http://www.bls.gov/iif/home.htm>, abgerufen am 27.03.2001.

- Byl, N.N., Merzenich, M.M. & Jenkins, W.M. (1996). A primate genesis model of focal dystonia and repetitive strain injury: I. Learning-induced dedifferentiation of the representation of the hand in the primary somatosensory cortex in adult monkeys. *Neurology*, 47 (2), 508-520.
- Cakir, A. (1978). Untersuchung zur Anpassung von Bildschirmarbeitsplätzen an die physische und psychische Funktionsweise des Menschen. *Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung*.
- Cakir, A., Hart, D. J. & Stewart, T. F. (1979). *The VDT Manual*. Darmstadt: IFRA.
- Camphausen, C. von (1993). *Die Sinne des Menschen* (2. Aufl.). Stuttgart: Thieme.
- Carter, M.C. & Shapiro, D.C. (1984). Control of sequential movements: evidence for generalized motor programs. *Journal of neurophysiology*, 52 (5), 787-796.
- Castellote, J.M., Valls-Solé, J. & Sanegre, M. T. (2004). Ballistic reactions under different motor sets. *Experimental brain research*, 158 (1), 35-42.
- Christ, O. (2002). *Experimentelle Untersuchung zum Einfluss von peripherer perzeptuomotorischer Interferenz auf psychophysiologische Parameter bei der Bildschirmarbeit. Eine Studie zum RSI Syndrom*. Unveröffentlichte Diplomarbeit an der Technischen Hochschule Darmstadt, Institut für Psychologie.
- Chambers, C.D. & Brown, M. (2003). Timing accuracy under microsoft windows revealed through external chronometry. *Behavior research methods, instruments, & computers: a journal of the Psychonomic Society Inc*, 35 (1), 96-108.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). London: Lawrence Erlbaum Associates.
- Cook, C.J. & Kothiyal, K. (1998). Influence of mouse position on muscular activity in the neck, shoulder and arm in computer users. *Applied ergonomics*, 29 (6), 439-443.
- Davis, K.D., Kwan C.L., Crawley, A.P. & Mikulis, D.J. (1998). Functional mri study of thalamic and cortical activations evoked by cutaneous heat, cold, and tactile stimuli. *Journal of Neurophysiology*, 80, 1533-1546.

- Delisle, A., Imbeau, D., Santos, B., Plamondon, A. & Monpetit, Y. (2004). Left-handed versus right-handed computer mouse use: effect on upper-extremity posture. *Applied ergonomics*, 35 (1), 21-28.
- De Marées, H. (2003). *Sportphysiologie* (9. Aufl.). Köln: Sport und Buch Strauß.
- Dennerlein, J.T., Mote Jr., C.D. & Rempel, D. M. (1998). Control strategies for finger movement during touch-typing. The role of the extrinsic muscles during a keystroke. *Experimental brain research*, 121 (1), 1-6.
- Douglas, S.A. & Mithal, A.K. (1997). *The ergonomics of computer pointing devices*. New York: Springer Verlag.
- Duncan, J. & Ferguson, D. (1974). Keyboard operating posture and symptoms in operating. *Ergonomics*, 17 (5), 651-662.
- Eagleman, D. & Churchland, P. (2006) *Ten Unsolved Questions of Neuroscience*. Cambridge: MIT Press.
- Enoka, R.M. (1983). Muscular control of a learned movement: the speed control system hypothesis. *Experimental brain research*, 51 (1), 135-145.
- Falconer, K. & Winter, D.A. (1985). Quantitative assessment of co-contraction at the ankle joint in walking. *Electromyography and clinical neurophysiology*, 25 (2-3), 135-149.
- Fernström, E., Ericson, M. & Malmer, H. (1994). Elektromyographic activity during typewriter and keyboard use. *Ergonomics*, 37 (3), 477-484.
- Fernström, E. & Ericson, M.O. (1997). Computer mouse or Trackpoint—effects on muscular load and operator experience. *Applied Ergonomics*, 28 (5-6), 347-354.
- Fink, G.R., Marshall, J.C., Halligan, P.W., Frith, C.D., Driver, J., Frackowiak, R.S., et al. (1999). The neural consequences of conflict between intention and the senses. *Brain*, 122 (3), 497-512.
- Flodgren, G., Heiden, M., Lyskov, E. & Crenshaw, A.G. (2007). Characterization of a laboratory model of computer mouse use – applications für studying risk factors for musculoskeletal disorders. *Applied ergonomics*, 38 (2), 213-218.

- Fogleman, M. & Brogmus, G. (1995). Computer mouse use and cumulative trauma disorders of the upper extremities. *Ergonomics*, 38 (12), 2465-2475.
- Frost, G., Dowling, J., Dyson, K. & Bar-Or, O. (1997). Cocontraction in three age groups of children during treadmill locomotion. *Journal of electromyography and kinesiology*, 7 (3), 179-186.
- Galen, G. P. van, Liesker, H. & de Haan, A. (2007). Effects of a vertical keyboard design on typing performance, user comfort and muscle tension. *Applied ergonomics*, 38 (1), 99-107.
- Galen, G.P. van, Müller, M.L., Meulenbroek, R.G. & Gemmert, A.W. van (2002). Forearm EMG response activity during motor performance in individuals prone to increased stress reactivity. *American journal of industrial medicine*, 41 (5), 406-419.
- Gavhed, D. (2003). *Human responses to cold and wind*. Unveröffentlichte Dissertation, Karolinska Institutet, Department of physiology and pharmacology, Stockholm, Schweden.
- Gehring, A. & Blaser, A. (1982). *Minnesota Multiphasic Personality Inventory: MMPI (Deutsche Kurzform für Handauswertung)*. Bern: Huber.
- Gentner, D.R. (1981). *Skilled finger movements in typing* (CHIP 104). Washington, D.C.: Center for Human Information Processing, University of California, San Diego.
- Gentner, D.R., Larochelle, S. & Grudin, J. (1988). Lexical sublexical and peripheral effects in skilled typewriting. *Cognitive Psychology*, 20, 524- 548.
- Gerard, M.J., Armstrong, T.J., Martin, B.J. & Rempel, D.A. (2002). The effects of work pace on within-participant and between-participant keying force, electromyography, and fatigue. *Human Factors*, 44 (1), 51-61.
- Ghez, C. & Krakauer, J. W. (2000). The organization of movement. In E. R. Kandel, J. H. Schwartz, T. M. Jessell (Eds.), *Principles of neural science* (4th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Gomi, H. & Kawato, M. (1997). Human arm stiffness and equilibrium-point trajectory during multi-joint movement. *Biological cybernetics*, 76 (3), 163-171.

- Gordon, A.M. & Soechting, J.F. (1995). Use of tactile afferent information in sequential finger movements. *Experimental brain research*, 107 (2), 281-292.
- Greenspan, J.D., Taylor, D.J. & McGillis, S.L. (1993). Body site variation of cool perception thresholds, with observations on paradoxical heat. *Somatosensory and motor research*, 10 (4), 467-474.
- Grudin, J. (1983). Non-hierarchic specification of components in transcription typewriting. *Acta Psychologica*, 54, 249-262.
- Guggenbühl, U. & Krueger, H. (1990). *Muscular strain resulting from keyboard use. Work with display units*. North-Holland: Elsevier Science Publishers (B.V.).
- Gustafsson, E. & Hagberg, M. (2003). Computer mouse use in two different hand positions: exposure, comfort, exertion and productivity. *Applied ergonomics*, 34 (2), 107-113.
- Hart, S.G. & Staveland, L.E. (1988). Human Mental Workload. In P. A. Hancock & N. Meshkati, *Development of an multi-dimensional workload rating scale: Results of empirical and theoretical research* (pp. 139-183). Amsterdam: Elsevier.
- Hatze, H. (2001). Letter to the editor: Comments on 'theoretical considerations on cocontraction of sets of agonistic and antagonistic muscles. *Journal of biomechanics*, 34 (7), 975-976.
- Hensel, H. (1981). *Thermoreception and Temperature Regulation*. London: Academic Press
- Herzog, W. & Binding, P. (1993). Cocontraction of pairs of antagonistic muscles: analytical solution for planar static nonlinear optimization approaches. *Mathematical biosciences*, 118 (1), 83-95.
- Heuer, H. (1983). *Bewegungslernen*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Holroyd, C.B. & Coles, M.G. (2002). The neural basis of human error processing: reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychological review*, 109 (4), 679-709.
- Holst, E. von & Mittelstaedt, H. (1950). Das Reafferenzprinzip. Wechselwirkungen zwischen Zentralnervensystem und Peripherie. *Die Naturwissenschaften*, 37, 464-476.

- Hunter, A.M., Claire-Gibson, A.S., Mbambo, Z., Lambert, M.I. & Noakes, T.D. (2002). The effects of heat stress on neuromuscular activity during endurance exercise. *Pflugers Arch- European journal of physiology*, 444 (6), 738-743.
- Jay, C., Glencross, M. & Hubbard, R. (2007). Modeling the effects of delayed haptic and visual feedback in a collaborative virtual environment. *ACM Transaction on Computer-Human Interaction*, 14 (2), Article 8.
- Jay, C. & Hubbard, R. (2005). Delayed visual and haptic feedback in a reciprocal tapping task. In *Proceedings of world Haptics Conference 2005*, 655-656. Pisa: IEEE.
- Jensen, C., Borg V, Finsen L, Hansen K, Juul-Kristensen B, Christensen H. (1998). Job demands, muscle activity and musculoskeletal symptoms in relation to work with the computer mouse. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 24 (5), 418-424
- Jensen C., Finsen L., Hansen K., Christensen H. (1999). Upper trapezius muscle activity patterns during repetitive manual material handling and work with with a computer mouse. *Journal of electromyography and kinesiology*, 9 (5), 317-25.
- Jueptner, M. & Weiller, C. (1998). A review of differences between basal ganglia and cerebellar control of movements as revealed by functional imaging studies. *Brain*, 121 (8), 1437-1449.
- Kandel, E.R. (2000). *Principles of Neural Science* (4th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Kao, H. (1977). Effects of feedback and intermittency of feedback in compensatory tracking. *Perception and motor skills*, 44, 1079-1085.
- Kalmus, H., Fry, D. & Denes, P. (1960). Effects of delayed visual control on writing, drawing and tracing. *Language and speech*, 3, 96-108.
- Karlqvist, L. (1998). Avoid the mouse trap! Musculoskeletal injuries can be reduced by placing the mouse within shoulder spare. *Läkartidningen*, 95 (36), 3768-3771.
- Karlqvist, L.K., Bernmark, E., Ekenvall, L., Hagberg, M., Isaksson, A. & Rostö, T. (1998). Computer mouse position as a determinant of posture, muscular load and perceived exertion. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 24 (1), 62-73.
- Karnath, H.O. & Thier, P. (2003). *Neuropsychologie*. Berlin: Springer Verlag.

- Keir, P.J., Bach, J.M. & Rempel, D. (1999). Effects of computer mouse design and task on carpal tunnel pressure. *Ergonomics*, 42 (10), 1350-60.
- Kellis, E. (1998). Quantification of quadriceps and hamstring antagonist activity. *Sports medicine*, 25 (1), 37-62.
- Kellis, E., Arabatzi, F. & Papadopoulos, C. (2003). Muscle co-activation around the knee in drop jumping using the co-contraction index. *Journal of electromyography and kinesiology*, 13 (3), 229-238.
- Kharraz-Tavakol, O.D., Eggert, T., Mai, N. & Straube, A. (2000). Learning to write letters: transfer in automated movements indicates modularity of motor programs in human subjects. *Neuroscience letters*, 282 (1-2), 33-36.
- Kleinböhl, D., Baus, D., Hornberger, U. & Hölzl, R. (2005). Schmerzgedächtnis und Sensibilisierung. *Psychoneuro*, 31 (2) , 84-91.
- Knutson L., Soderberg G., Ballantyne B. & Clarke W., (1994). A study of various normalization procedures for within day electromyographic data. *Journal of electromyography and kinesiology*, 4, 47-59.
- Kobayashi, M., Hutchinson, S., Théoret, H., Schlaug, G. & Pascual-Leone, A. (2004). Repetitive TMS of the motor cortex improves ipsilateral sequential simple finger movements. *Neurology*, 62 (1), 91-98.
- Kornbrot, D. E. (1989). Organisation of keying skills: the effect of motor complexity and number of units. *Acta Psychologica*, 70, 19-41.
- Kotani, K. & Horii, K. (2003). An analysis of muscular load and performance in using a pen-tablet system. *Journal of physiological anthropology and applied human science*, 22 (2), 89-95.
- Lange, K. (2003). *Vergleich von Leistung und Missempfindung bei der Benutzung verschiedener PC-Eingabegeräte*. Unveröffentlichte Studienarbeit, Technische Universität Darmstadt.
- Lashley, K. S. (1917). The accuracy of movement in the absence of excitation from the moving organ. *American journal of physiology*, 43, 169-194.

- LaStayo, P.C., Woolf, J.M., Lewek, M.D., Snyder-Mackler, L., Reich, T., Lindstedt, S.L. (2003) Eccentric muscle contractions: Their contribution to injury prevention rehabilitation and sport. *Journal of Orthopadic Sports and Physical Therapy*, 33, 557-571.
- Laube, W. (2004). Das sensomotorische System, die Bewegungsprogrammierung und die sensomotorische Koordination beim Gesunden und Verletzten. *Österreichische Zeitschrift für Physikalische Medizin und Rehabilitation*, 14 (1), 35-49.
- Lintula M., Nevala-Puranen, N. & Louhevaara, V. (2001). Effects of Ergorest arm supports on muscle strain and wrist positions during the use of the mouse and keyboard in work with visual display units: a work site intervention. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 7 (1), 103-116.
- Long, D.A. (1994). Hand differences and reported intensity of nociceptive stimuli. *Perceptual and motor skills*, 79, 411-417.
- Lund, J. P., Donga, R., Widmer, C.G. & Stohler, C.S. (1991). The pain-adaptation model: a discussion of the relationship between chronic musculoskeletal pain and motor activity. *Canadian journal of physiology and pharmacology*, 69 (5), 683-694
- Lund, J.P., Stohler, C.S. & Widmer, C.G. (1993). The relationship between pain and muscle activity in fibromyalgia and similar conditions. In H. Værøy & H. Merskey (Hrsg.), *Progress in Fibromyalgia and Myofascial Pain*. (Kap. 23). North-Holland: Elsevier Science Publishers (B.V.).
- Lund, J.P & Stohler, C.S. (2007). Critical Commentary 2. Orofacial pain and jaw muscle activity: a new model. *Journal of orafacial pain*, 21 (4), 282- 283.
- Lundervold, A. (1951). Elektromyographic investigations during sedentary work, especially typewriting. *British journal of physical medicine*, 14 (2), 32-36.
- Lundervold, A. (1958). Elektromyographic investigations during typewriting. *Ergonomics*, 1 (3), 226-230.
- Margolin, D. I. (1984). The neuropsychology of writing and spelling: semantic, phonological, motor, and perceptual processes. *The quarterly journal of experimental psychology. A, human experimental psychology*, 36 (3), 459-489.

- Marklin, R. W., Simoneau, G. G. & Monroe, J. F. (1999). Wrist and forearm posture from typing on split and vertically inclined computer keyboards. *Human factors*, 41 (4), 559-569.
- Mordini, E. (2007). Technology and fear: is wonder the key? *Trends in biotechnology*, 25 (12), 544-546.
- McCabe, C.S., Haigh, R.C., Halligan, P.W. & Blake, D.R. (2005). Simulating sensory-motor incongruence in healthy volunteers: implications for a cortical model of pain. *Rheumatology*, 44 (4), 509-516.
- Meinck, H. M., Benecke, R., Mayer, B., Höhne, J. & Conrad, B. (1984). Human ballistic finger flexion. Uncoupling of the three-burst pattern. *Experimental brain research*, 55 (1), 127-133.
- Mense, S. (1978). Effects of temperature of the discharges of muscle spindles and tendon organs. *Pflugers Archive*, 374 (2), 159-166.
- Mense, S. (2007). Critical Commentary 1. Orofacial pain and jaw muscle activity: a new model. *Journal of orofacial pain*, 21 (4), 279- 281.
- Mense, S. (2004). Mechanismen der Chronifizierung von Muskelschmerz. *Der Orthopäde*, 33, 525–532.
- Milner, T.E. & Cloutier, C. (1998). Damping of the wrist joint during voluntary movement. *Experimental brain research*, 122 (3), 309-317.
- Murray, G.N.& Peck, C.C. (2007). Orofacial pain and jaw muscle activity: a new model. *Journal of orofacial pain*, 21 (4), 263- 278.
- Nieuwenhuijzen, P.H.J.A. Schillings, A. M. Van Galen G. P. & Duysens, J. (2000). Modulation of the Startle Response During Human Gait. *Journal of Neurophysiology* 84:65-74, 2000
- Nijhof, E.J. (2003). On-line trajectory modifications of planar, goal-directed arm movements. *Human movement science*, 22 (1), 13-36.
- Nomura, T., Kawano, F., Kang, M.S., Lee, J.H., Han, B.Y., Kim, C.K., et al. (2002). Effects of long term cold exposure on contractile properties in slow and fast twitch muscles of rats. *Japanese journal of physiology*, 52 (1), 85-93.

- Oksa, J., Ducharme, M.B. & Rintamäki, H. (2002). Combined effect of repetitive work and cold on muscle function fatigue. *Journal of applied physiology*, 92 (1), 354-361.
- Oksa, J., Rintamäki, H. & Rissanen, S. (1997). Muscle performance and electromyogram activity of the lower leg muscles with different levels of cold exposure. *European journal of applied physiology*, 75 (6), 484-490.
- Oksa, J., Rintamäki, H., Rissanen, S., Rytty, S., Tolonen, U. & Komi, P.V. (2000). Stretch and H-reflexes of the lower leg during whole body cooling and local warming. *Aviation space and environmental medicine*, 71 (2), 156-161.
- Oksa, J., Sormunen, E., Koivukangas, U., Rissanen, S. & Rintamäki, H. (2006). Changes in neuromuscular function due to intermittently increased workload during repetitive work in cold conditions. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 32 (4), 300-309.
- Oldfield, R.C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9 (1), 97-113.
- Olney, S. J., (1985). Quantitative evaluation of cocontraction of knee and ankle muscle during walking. In D.A. Winter, R.W. Norman, P. Wells, K.C. Hayes, A.E. Patla (Eds.), *Biomechanics IX-A* (S. 341-346). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Osu, R., Gomi, H., Domen, K., Yoshioka, T. & Kawato, M. (1999). *Decrease in joint stiffness during motor learning revealed from measured emg signals*. Kawato dynamic brain project technical report KDB-TR-4, 1-50.
- Palmer, K.T., Reading, I., Calnan, M. & Coggon, D. (2008). How common is repetitive strain injury? *Occupational and environmental medicine*, 65 (5), 331-335.
- Peck, C.C. Murray, G.M & Gerzina, T.M (2008). How does pain effect jaw muscle activity. The integrated pain adaption model. *Australian dental journal*, 53, 201-207.
- Pinnock, J., Curran D. and Olsen A., (2002). *Visual Basic. NET Remoting Handbook*. Berkeley: Apress
- Plant, R. R., Hammond, N. V. & Whitehouse T. (2003). How choice of mouse may effect response timing in psychological studies. *Behavior Research Methods, Instruments and Computers*, 35 (2), 276-284.

- Rabin, E. & Gordon, A.M. (2004). Tactile feedback contributes to consistency of finger movements during typing. *Experimental brain research*, 155 (3), 362-369.
- Rao & Gordon, (2001). Contribution of tactile information to accuracy in pointing movements. *Experimental Brain Research*, 138 (4), 438-445.
- Rasmussen, T. & Milner, B. (1977). The role of early left-brain injury in determining lateralization of cerebral speech functions. In S. Dimond & D. Blizard (Eds.), *Evolution and Lateralisation of the brain*. New York: Academy of Science.
- Rempel, D., Barr, A., Brafman, D. & Young, E. (2007). The effect of six kexboard designs on wrist and forearm postures. *Applied Ergonomics*, 38 (3), 293-298.
- Revenstorf, D. (1979). *Zeitreihenanalyse für klinische Daten. Methodik und Anwendungen*. Weinheim: Beltz.
- Rissanen, S., Oksa, J., Rintamäki, H. & Tokura, H. (1996). Effects of leg covering in humans on muscle acitivity and thermal responses in a cool environment. *European journal of applied physiology*, 73 (1-2), 163-168.
- Roberton, M. A. & Halverson, L. E. (1988). The development of locomotor coordination: longitudinal change and invariance. *Journal of motor behavior*, 20 (3), 197-241.
- Roerding, M., Peper, C. E. & Beek, P. J. (2005). Effects of correct and transformed visual feedback on rhythmic visuo-motor tracking: tracking performance and visual search behavior. *Human movement science*, 24 (3), 379-402.
- Rothwell, J.C., Traub, M. M., Day, B. L., Obeso, J.A., Thomas, P. K. & Marsden, C. D. (1982). Manual motor performance in a deafferented man. *Brain*, 105 (3), 515-42.
- Rumelhart, D. E. & Norman, D. A. (1982). Simulating a skilled typist: a study of skilled cognitive-motor performance. *Cognitive science*, 6, 1-36.
- Salthouse, T. A. (1986). Perceptual, cognitive and motoric aspects of transcription typing. *Psychological Bulletin*, 99 (3), 303-319.
- Sanes, J. N., Mauritz, M., Dalakas, M. C. & Evarts, E. V. (1985). Motor control in humans with large fiber sensory neuropathy. *Human neurobiology*, 4 (2), 101-114.

- Schieppati, M. & Nardone, A. (1997). Medium-latency stretch reflexes of foot and leg muscles analysed by cooling the lower limb in standing humans. *Journal of physiology*, 503 (3), 691-698.
- Schmidt, F. (1998). *Über die Wirkung von Schmerz und Streß auf psychophysiologische Parameter repetitive Bewegungen – Eine experimentelle Untersuchung zum RSI-Syndrom*. Unveröffentlichte Diplomarbeit an der Technischen Universität Darmstadt, Institut für Psychologie.
- Schmidt, R.F., Lang, F. & Thews, G. (2004). *Physiologie des Menschen* (29., neu bearbeitete Auflage). Berlin: Springer Verlag GmbH.
- Shimizu, H. (2002). Measuring keyboard response delays by comparing keyboard and joystick inputs. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, 34 (2), 250-256.
- Silverstein, B., Welp, E., Nelson, N. & Kalat, J. (1998). Claims incidence of work-related disorders of the upper extremities: Washington state, 1987 through 1995. *American journal of public health*, 88 (12), 1827-1833.
- Soechting, J. F. & Flanders, M. (1997). Flexibility and repeatability of finger movements during typing: analysis of multiple degrees of freedom. *Journal of computational neuroscience*, 4 (1), 29-46.
- Solomonow, M., Guzzi, A., Baratta, R., Shoji, H. & D'Ambrosia, R. (1986). EMG-force model of the elbows antagonistic muscle pair. The effect of joint position, gravity and recruitment. *American journal of physical medicine*, 65 (5), 223-244.
- Sorgatz, H. (2005). Chronische Bewegungsschmerzen, Neuroplastizität und Bewusstsein. *Hypnose und Kognition*, 0 (1+2), 1-19.
- Sorgatz, H. (2002). Repetitive strain injuries - Unterarm-/Handbeschwerden aufgrund repetitiver Belastungsreaktionen des Gewebes. *Orthopäde*, 31, 1006-1014.
- Sorgatz, H., Christ, O., Ullrich, D. & Diefenbach, S. (2007). Is the tablet pen an ergonomical alternative to the computer mouse? [Abstract]. In A. Toomingas, A. Lantz & T. Berns (Eds.), *Computing Systemy for Human Benefits from the 8th Conference on Work With Comupting Systems*. (p. 79). Stockholm: Royal Institute of Technology.

- Stohler, C.S., Zhang, X. & Lund, J.P. (1996). The effect of experimental jaw muscle pain on postural muscle activity. *Pain*, 66 (2-3), 215-221.
- Sutter, C. (2006). *Charakteristische Nutzereigenschaften und ihr Einfluss auf die Bedienung von Notebook-Eingabegeräten: eine arbeitspsychologische Evaluation von Touchpad und Trackpoint*. Unveröffentlichte Dissertation, RWTH-Aachen Universität.
- Suzuki, M., Shiller, D.M., Gribble, P.L. & Ostry, D.J. (2001). Relationship between cocontraction, movement kinematics and phasic muscle activity in single-joint arm movement. *Experimental brain research*, 140 (2), 171-181.
- Svensson, P., Houe, L. & Arendt-Nielsen, L. (1997). Bilateral experimental muscle pain changes electromyographic activity of human jaw-closing muscles during mastication. *Experimental brain research*, 116 (1), 182-185.
- Szeto, Straker, O'Sullivan, 2005. EMG median frequency changes in the neck-shoulder stabilizers of symptomatic office workers when challenged by different physical stressors. *Journal of electromyography and kinesiology* 15 (6), 544-555
- Tepper, M., Vollenbroeck-Hutten, M.M., Hermens, H.J. & Baten, C.T. (2003). The effect of an ergonomic computer device on muscle activity on the upper trapezius during typing. *Applied ergonomics*, 34 (2), 125-130.
- Terzuolo, C.A. & Viviani, P. (1980). Determinants and characteristics of motor patterns used for typing. *Neuroscience*, 5 (6), 1085-1103.
- Teulings, H.L. (1994). Bewegungssteuerung beim Schreiben. In Birbaumer, N., Graumann, C.F., Irle, M., Kuhl, J., Prinz, W. & Weinert, F.E. (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie. Themenbereich C: Theorie und Forschung. Serie II: Kognitionen. Band 3 Psychomotorik* (S. 703-772). Göttingen: Hogrefe.
- Troll, L. (2000): Die Arbeitsmittellandschaft in Deutschland im Jahre 1999. In: Dostal, W. Jansen R., Parmentier, K. (Hrsg.), *Wandel der Erwerbsarbeit: Arbeitssituation, Informatisierung, berufliche Mobilität und Weiterbildung*. (S. 125-150). Nürnberg: Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung.
- Tucker, R., Rauch, L., Harley, Y.X. & Noakes, T.D. (2004). Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment. *Pflugers Archive - European journal of physiology*, 448 (4), 422-430.

- Ullman, J., Kangas, N., Ullman, P., Wartenberg, F. & Ericson, M. (2003). A new approach to the mouse arm syndrome. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 9 (4), 463-477.
- Ullrich, D. & Diefenbach, S. (2006). *Maus und Stift bei der Bildschirmarbeit. Ein Vergleich von Leistungswerten, Muskelwerten, Muskelspannung und Befindlichkeit*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt, Institut für Psychologie.
- Unnithan, V.B., Dowling, J., Frost, G., Ayub, B. & Bar-Or, O. (1996). Cocontraction and phasic activity during gait in children with cerebral palsy. *Electromyography and clinical neurophysiology*, 46, 487-494.
- Valls-Sole, J., Kumru, H. & Kofler, M. (2008). Interaction between startle and voluntary reactions in humans. *Experimental Brain Research*, 187, 497–507
- Viitasalo, J. T., Salo, A. & Lahtinen, J. (1998). Neuromuscular functioning of athletes and non-athletes in the drop jump. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 78 (5), 432-440.
- Visser, B., De Looze, M., De Graaff, M. & Van Dieen, J., (2004). Effects of precision demands and mental pressure on muscel activation and hand forces in computer mouse tasks. *Ergonomics*, 47 (2), 202-217.
- Viviani, P. & Laissard, G. (1996). Motor templates in typing. *Journal of experimental psychology*, 22 (2), 417-445.
- Voigt, M., Simonsen, E.B., Dyhre-Poulsen, P. & Klausen, K. (1995). Mechanical and muscular factors influencing the performance in maximal vertical jumping after different prestretch loads. *Journal of biomechanics*, 28 (3), 293-307.
- Wahlström, J., Svensson, J., Hagberg, M. & Johnson, P.W. (2000). Differences between work methods and gender in computer mouse use. *Scandinavian journal of work, environment and health*, 26 (5), 390-397.
- Wall, P.D. & Melzack, R. (1999). *Textbook of Pain* (4th ed.). Oxford: Churchill Livingstone
- Wandmacher, J. (1993). *Software-Ergonomie*. Berlin: de Gruyter.

- Waters, P. & Strick, P.L. (1981). Influence of strategy on muscle activity during ballistic movements. *Brain research*, 207 (1), 189-194.
- Zilske, F. (2000). *Repetitive Strain Injury (RSI) bei Bildschirmarbeitskräften. Eine experimentelle Untersuchung zur Funktion von Leistungsanspruch, Perzeptuo-Motorischer-Interferenz und Schmerzwahrnehmung bei der Entstehung bewegungsbedingter Störungen*. Hamburg: Dr. Kovac.
- Zöller, H. & Konheisner, S. (1999). Fitts' Gesetz bei Maus, Trackball: ein experimenteller Test zur ergonomischen Bewertung von Computereingabegeräten. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaften*, 4/99, 237-241.
- Zuberbühler, H.J., Krueger, H. & Kündig, A. (2003). *Delay perception thresholds in human-computer interaction: Fundamentals for CSCW-applications*. Swiss Federal Institut of Technology Zurich, Institut of Hygiene and Applied Physiology: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/view/eth:26726> , abgerufen am 08.08.09.

10. Anhang

10.1 Anhang A

BEFINDLICHKEITSBOGEN 1

Vor Beginn des Versuchs bitten wir Sie um einige Angaben zu ihrer jetzigen Befindlichkeit. Bitte machen Sie ein Kreuz auf der Linie um auszudrücken, ob und wie sehr die Aussage zutrifft.

1 Ich spüre Anspannung im Unterarm-Bereich

nicht wahrnehmbar |-----| deutlich wahrnehmbar

2 Ich spüre Schmerzen im Unterarm-Bereich

nicht wahrnehmbar |-----| deutlich wahrnehmbar

3 Ich spüre Kribbeln im Unterarm-Bereich

nicht wahrnehmbar |-----| deutlich wahrnehmbar

4 Ich spüre Taubheit im Unterarm-Bereich

nicht wahrnehmbar |-----| deutlich wahrnehmbar

5 Ich spüre Anspannung im Nacken-/Schulter-Bereich

nicht wahrnehmbar |-----| deutlich wahrnehmbar

6 Ich spüre Schmerzen im Nacken-/Schulter-Bereich

nicht wahrnehmbar |-----| deutlich wahrnehmbar

7 Ich spüre Kribbeln im Nacken-/Schulter-Bereich

nicht wahrnehmbar |-----| deutlich wahrnehmbar

8 Ich spüre Taubheit im Nacken-/Schulter-Bereich

nicht wahrnehmbar |-----| deutlich wahrnehmbar

8. Weitere Fragen

Tragen Sie einen Herzschrittmacher oder Defibrillator ja ☐ 1 nein ☐ 2
Tragen Sie Metallimplantate ja ☐ 1 nein ☐ 2 wenn ja, wo? _____
Sind Sie zur Zeit Schwanger? ja ☐ 1 nein ☐ 2 wenn ja, im wievielten Monat? ____
Nehmen Sie zur Zeit (inkl. letzte 10 Tage) Medikamente? ja ☐ 1 nein ☐ 2 wenn ja, welche? _____

Bitte beantworten Sie abschließend die folgenden Fragen:

9. Beruf: _____

10. Wie viele Stunden pro Woche und auf wie viele Tage pro Woche (1-7) verteilt üben Sie Ihren Beruf aus?

Stunden pro Woche _____ Stunden Tage pro Woche _____ Tage

11. Wie belastend für Ihren Hand-/Armbeereich beurteilen Sie Ihre berufliche Tätigkeit?

gar nicht belastend sehr belastend
|-----|

12. Hobbys: _____

13. Wie viele Stunden pro Woche und auf wie viele Tage pro Woche (1-7) verteilt üben Sie diese Hobbys aus?

Stunden pro Woche _____ Stunden Tage pro Woche _____ Tage

14. Wie belastend für Ihren Hand-/Armbeereich beurteilen Sie Ihre Hobbys?

gar nicht belastend sehr belastend
|-----|

15. Wie viele Stunden pro Woche und auf wie viele Tage pro Woche (1-7) verteilt nutzen Sie einen PC?

Stunden pro Woche _____ Stunden Tage pro Woche _____ Tage

16. Wie belastend für Ihren Hand-/Armbeereich beurteilen Sie diese PC-Tätigkeiten?

gar nicht belastend sehr belastend
|-----|

17. Vor wie vielen Jahren haben Sie das Zehn-Finger-System gelernt? Seit wann wenden Sie es professionell an?

vor _____ Jahren erlernt seit _____ Jahren in Anwendung

18. Wie viel Prozent Ihrer Arbeitszeit am PC nutzen Sie aktuell die Maus bzw. die Tastatur (Zehn-Finger-System)?

Mausnutzung _____ % Tastaturnutzung _____ %

19. Hatten Sie in den letzten 6 Monaten Schmerzen im Hand-/Armbeereich? Wenn ja, wie stark waren die Schmerzen?

keine höchst unerträglich
|-----|

Vielen Dank für die Beantwortung der Fragen. Bitte geben Sie nun den Fragebogen an den Versuchsleiter zurück.

10.3 Anhang C

[Pb _____ Abschnitt _____]

Bitte kreuzen Sie auf der Linie an, wie sehr die Aussagen zutreffen.

Ich fühle mich wohl.

Stimmt nicht |-----| Stimmt

Das Schreiben fällt mir einfach, es ist wie immer.

Stimmt nicht |-----| Stimmt

Die Beweglichkeit meiner linken Hand ist eingeschränkt.

Stimmt nicht |-----| Stimmt

Die Beweglichkeit meiner rechten Hand ist eingeschränkt.

Stimmt nicht |-----| Stimmt

Ich habe Schmerzen in der linken Hand.

Stimmt nicht |-----| Stimmt

Ich habe Schmerzen in der rechten Hand.

Stimmt nicht |-----| Stimmt

Ich habe Schmerzen im linken Unterarm.

Stimmt nicht |-----| Stimmt

Ich habe Schmerzen im rechten Unterarm.

Stimmt nicht |-----| Stimmt

Ich habe Schmerzen im linken Oberarm.

Stimmt nicht |-----| Stimmt

Ich habe Schmerzen im rechten Oberarm.

Stimmt nicht |-----| Stimmt

Ich habe Schmerzen im Schulter-/Nackenbereich.

Stimmt nicht |-----| Stimmt

Ich habe Schmerzen im Rücken.

Stimmt nicht |-----| Stimmt

10.4 Lebenslauf

2003, 11 - 2009, 03

**Technische Universität Darmstadt , Institut für
Psychologie, AG Klinische Psychologie und
Psychotherapie**

Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter mit
Aufgaben in der Lehre, Forschung und akademischen
Selbstverwaltung.

2003, 4 – 2003, 10

**Technische Universität Darmstadt, Institut für
Psychologie, AG Klinische Psychologie und
Psychotherapie**

Anstellung als geprüfte wissenschaftliche Hilfskraft

1996, 10 – 2003, 02

**Technische Universität Darmstadt, Institut für
Psychologie**

Studium der Psychologie

1995, 10 – 1996, 02

**Technische Universität Darmstadt, Fachbereich
Biologie**

Studium der Biologie

1989 – 1994,

Geschwister-Scholl-Schule Bensheim

1984 – 1989,

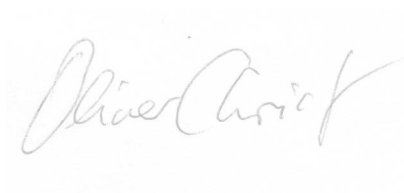
Altes Kurfürstliches Gymnasium Bensheim

1980 – 1984

Hemsbergerschule Bensheim

10.5 Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit – abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen – selbständig verfasst habe.

A handwritten signature in cursive script, reading "Oliver Christ". The ink is dark and the signature is written on a light-colored background.

Oliver Christ,

Darmstadt, 15.12.2008